Jean-Pierre Petit

Physique : la symétrie oubliée

pour sortir du labyrinthe

der Kurven A, B, C die sechs Knoten und heften die Ränder kreuzweise aneinander. Damit ist die Fläche fertig, in den Kurven A, B, C durchdringt je ein Cylinder senkrecht ein ebenes Blatt. Der Anfangspunkt ist

Fig. 20a. Fig. 20b.

ein dreifacher Punkt der Fläche. Die sich dort durchdringenden Mäntel haben die Koordinatenebenen zu Tangentialebenen. Wir sehen, unsere Fläche ist singularitätenfrei. Die Kurven A, B, C bilden in ihrer Ge-

Depuis cinquante ans la physique théorique, la cosmologie et l'astrophysique n'ont rien produit de tangible. Quelque chose est survenu autour des années soixante-dix ». Tout s'est soudain bloqué, alors que les soixante dix précédentes années avaient été un véritable âge d'or de ces disciplines. Pendant ces années la théorie, l'expérience et l'observation s'étaient conjuguées pour produire une explosion de découvertes » Soudain, tout s'arrête. Les observations et les expériences cessent de s'accorder avec les prévisions théoriques. Les modèles semblent avoir atteint leurs limites.

Le but de ce livre est de retracer brièvement ces échecs et d'identifier les causes de ceux-ci. On montrera ensuite que se présentent des voies salvatrices, que la communauté scientifiques, accrochée à des idées simplement délirantes et stériles, rechigne à suivre.

Chapitre 1

La révolution scientifique du dix-neuvième siècle.

Quand de nouvelles idées, de nouveaux concepts, de nouveaux outils de pensées apparaissent ils modifie fortement la vision des choses au moment où des scientifiques les font émerger, comme des forgerons de leurs forges. Mais ils peuvent conserver une grande fonctionnalité des années plus tard, y compris à notre époque.

Nous citerons deux exemples significatifs.

L'émergence de certaines disciplines de la physique ressemblent à des accouchements. Pendant des longues années le bébé grandit. Les éléments qui le constituent s'assemblent petit à petit. En 1757 le génial mathématicien suisse Leonhard Euler assemble différents concepts dont chacun décrit un phénomène de conservation de quelque chose.

Leonhard Euler
(1707-1783).

Il exprime la conservation de la masse à travers une première équation. Puisla conservation de la quantité de mouvement dans une seconde. Enfin celle de l'énergie dans une troisième.

Mais ce qu'on eut déjà qualifier de modèle ne décrit pas complètement le comportement des fluides. Il manque quelque chose. Ces fluides d'Euler sont trop parfaits. On n'y trouve pas de turbidité. Ils n'exercent aucune force sur les objets qu'on y plonge. . Ils conservent leur énergie, mais n'en donnent ni n'en prélèvent à ce qui les entoure.

En 1822 le Français Henri Navier introduit ce concept manquant, auquel il donne le nom de viscosité .Dès lors, quand un fluide longe une paroi il lui transmet une partie de sa quantité de mouvement, et exerce une force de frottement.

Claude Navier
1785-1836

Mais c'est l'Anglais George Stockes qui donne à l'enfant tous ses attributs, toutes ses fonctionnalités, en 1845. Il ajoute aux équations de Navier tous les termes traduisant les mécanismes qui donnent à celles-ci leur complète fonctionnalité.

George Stokes
1819 - 1903

Ces équations, les voilà.

Les équations de Navier-Stokes.

C'est l'accouchement final. La palette des phénomènes que ces équations peuvent décrire est immense.

Que peut-on faire avec les équations de Navier-Stockes ? Un exemple : on peut créer un appareil comme le SR-71, volant à Mach 3.2

L'oiseau noir

Depuis 177 ans la nécessité d'améliorer cette modélisation mathématique de la mécanique des fluides ne s'est jamais présentée.

Nous donnerons un second exemple d'accouchement d'un modèle, merveilleusement adapté à la réalité qu'il cherche à décrire. En 1873 l'électromagnétisme existe sous forme de morceaux épars, de lois auxquelles on a déjà donné les noms de leurs auteurs. L'Ecossais James Clerc Maxwell parvient alors à les assembler en un tout harmonieux et fonctionnel.

James C. Maxwell
1831 - 1879

Par simple curiosité, voilà les équations de Maxwell :

Les équations de Maxwell

Vous voulez vous servir d'un séchoir à cheveux, émettre des ondes à direction d'une lointaine sonde en route pour Mars ? Les équations de Maxwell sont à votre service. Quand les scientifiques veulent concevoir un radiotélescope, sa conception repose encore sur ce système d'équations.

Radiotelesope

Out cela fonctionne si bien que depuis 150 ans personne ne songerait à améliorer cette façon mathématique de modéliser la valse des particules chargées électriquement.

Il fait reconnaître que certains modèles résistent au temps. Ils semblent ne pas vieillir, ce qui incite alors à leur conférer un parfum d'éternité. Il en est de même pour les constantes qu'on trouve dans ces belles équations, qualifiées d'universelles. Mais sont-elles réellement invariables ? C'est la question qui émergera plus loin dans ce livre.

A l'époque de Navier, de Stockes et de Maxwell nous sommes en plein dix-neuvième siècle. Mettons-nous à la place des scientifiques de cette époque. Ils éprouvent un vertige devant une telle explosion de connaissances.

Il faut dire que leurs modèles engendrent ce qu'on appellera plus tard la révolution industrielle. On remplace les chevaux par des machines à vapeur. Les ingénieurs créent de modernes tour de Babel, comme la Tour Eiffel. Les militaires, eux, conçoivent de grands poissons faits de métal qui tirent des torpilles propulsées par des moteurs électriques. Et, sur terre, on remplace le chevaux par des véhicules, mus également par des forces électriques, capables d'entraîner leur passager à 100 km à l'heure. Une vitesse que dont personne n'aurait imaginé dans le passé quelle puisse être atteinte un jour .

La Jamais contente, conçue et construite par le Belge Camille Jénatzy. Le seul véhicule capable, en 1899, d'atteindre une vitesse vertigineuse de cent kilomètres à l'heure.

Ainsi, en 1899 les scientifiques s'imaginent être arrivés aux frontières de la connaissance. Les modèles ont atteint, pensent-ils, la perfection. Aucun progrès n'est possible, dans le

domaine de la théorie. Il reste à exploiter à l'infini ces outils en créant des objets, des machines, des véhicules, des outils de mesure, d'observation et d'investigation.

William Thomson, d'origine irlandaise, maîtrise toute la science de son temps. On lui doit des théorèmes permettant différencier ce qui est réaliste et ce qui ne l'est pas. Il invente aussi d'ingénieurs dispositifs, dans de nombreux domaines. En tant que président de la Royal Society of London il n'hésite pas à dire que dans le domaine de la théorie, tout ce que l'on peut espérer et d'ajouter des chiffres après la virgules, dans les quantités numériques que l'on calcule.

William Thomson (Lord Kelvin)
1824-1907

Quand il décrivait le panorama des connaissances scientifiques de son temps il le comparaît à un ciel bleu où ne subsistait plus que quelques petits nuages gris.

Qu'entendait-il par-là ?

Chapitre 2 :

Les petits nuages gris de Lord Kelvin

Ceci nous amène à une année charnière que nous situerons en 1898. Effectivement, on sait que ce début de siècle mille neuf cent s'accompagne d'un grand bouleversement scientifique. Si la façon de voir les choses est appelée à être modifiée, c'est que des problèmes échappent aux outils de pensée des scientifiques.

Le premier problème que nous allons citer était connu de longue date C'est celui de l'avance du périhélie de Mercure. Un profond changement de paradigme représente l'abandon de l'hypothèse selon laquelle les planètes ne pouvaient qu'en emprunter des trajectoires circulaires. Tel l'avait énoncé Platon, pour la simple raison qu'elles étaient parfaites. De ce fait leurs orbites devait être circulaire, le cercle étant une excellente image des choses parfaites.

Grâce au ciel, le fait que ces trajectoires soient des ellipses, où le Soleil se situé sur l'un des foyers, finit par s'imposer. Enfin la mécanique de Newton expliqua que s'il en était ainsi, c'est qu'il ne pouvait en être autrement. Après avoir identifié ces planètes à des êtres divins, les hommes se décidaient à les réduire à la simple manifestation d'une mécanique céleste.

Se posait néanmoins la question de la stabilité des orbites. En effet toute planète, agissant sur les orbites de ses voisines grâce à son champ de gravitation, était susceptible de perturber cet harmonieux assemblages. Isaac Newton avait sa propre réponse, à cette question. Il Pensait que quand quelque chose tendait à faire qu'une planète s'écarte de son orbite, Dieu l'y replaçait aussitôt.

On trouve là une attitude mixte, mêlant science et religion.

Le Français Laplace mit fin à cette intervention du divin dans la chose cosmique, à l'aide de travaux plus élaborés. Au Premier Consul Bonaparte qui lui avait demandé la place de Dieu dans ces choses du ciel, le scientifique avait répondu : »

- Monsieur le Premier Consul, je n'ai pas eu besoin de cette hypothèse dans mes calculs.

Quoi qu'il en soit ces orbites devaient rester telles qu'elles étaient. Une ellipse possède deux axes, un petit et un grand. Quand cette ellipse représente l'orbite d'une planète, une des extrémités du grand axe représente le point où la planète est le plus éloignée du Soleil. On e nomme aphélie. L'autre point est celui de l'orbite où la planète passe au plus près du soleil . On le nomme périhélie. Mais quel est le degré d'excentricité des orbites des différentes planètes ? Je veux dire dans quelle mesure ces orbites s'écartent-elles du cercle (qui correspond à une excentricité zéro).

La figure ci-après montre les orbites des planètes, représentées par leurs symboles . Au centre se trouve le Soleil. Par ordre d'éloignement, les orbites représentées sont celles :

- de mercure
- de Vénus
- 1de la Terre
- de Mars

La différence avec un orbite circulaire ne commence vaguement à apprécier que pour celle de Mercure. Mais en fait la différence n’apparaît que par le décentrage vis-à-vis du Soleil, perceptible également pour l’orbite de Mars.

Néanmoins cela faisait bien longtemps que les astronomes étaient capable de déterminer avec précision les orbites des différentes planètes. On savait alors que celle de Mercure présentait une anomalie qui ne pouvait être expliquée par la mécanique newtonienne.

La figure ci-après montre une dérive de la trajectoire d’une masse autour d’une étoile à neutrons.

Avance du périhélie d’une masse orbitant autour d’une étoile à neutrons.

Cet effet est alors très important. Pour Mercure cette dérive n’est que de 43 secondes d’arc par siècle. Que représente cet angle ? Cela équivaut à un cheveu humain tenu à bout de bras. Autant dire que si nous voulions figurer la dérive de l’orbite de Mercure, à chaque tour, la variation serait inférieure à l’épaisseur du trait.

Mais les télescopes sont des engins d’observation très précis et à l’époque napoléonienne où vivait Urbain Le Verrier un tel écart ne pouvait être contesté.

Urbain le Verrier 1819-1892

Celui-ci s'intéresse à des variations de la trajectoire d'Uranus sur son orbite. Il opte pour l'hypothèse que celles-ci sont causées par l'interaction avec la masse d'une autre planète, encore inconnue. Par le calcul il parvient à déterminer sa position et dépose sur cette question un mémoire à l'académie des sciences le 31 juillet 1846. Il lui faut maintenant trouver un astronome qui puisse pointer son instrument dans cette direction.

Comme on le verra par la suite, ce livre pourrait être considéré avant toute chose comme traitant de sociologie des sciences. Le Verrier ne trouve aucun astronome français qui accepte de tenter de vérifier sa théorie. Comme il est en contact avec un astronome Allemand, installé à Berlin, Johann Gottfried Galle, il lui communique son évaluation des coordonnées de cette nouvelle planète à laquelle il donne l nom du dieu Neptune. Celui-ci reçoit son courrier le 23 septembre 1846. Le soir même il pointe sa lunette dans la direction déterminée par Le Verrier et trouve immédiatement la planète.

A cause de leur absence de réaction, les astronomes français perdent l'occasion d'inscrire leur nom dans l'histoire des sciences. Mais cette inertie, bien que coutumière en France, n'est pas l'apanage de ce pays. En Angleterre un jeune astronome, J.C.Adams, effectuant des calculs similaires à ceux de Le Verrier, et qui suppose lui aussi que les variations de la trajectoire d'Uranus sont dues à la présence d'une planète, détermine également sa précision. Quoi que ses chiffres soient moins précis que ceux de Le Verrier ; si les astronome anglais de Cambridge avait daigné lui porter attention, eux aussi aurait détecté la présence de l'astre, et cette découverte historique aurait été anglaise.

Au fil de ces pages nous nous attarderons ici et là sur des facettes de l'histoire des sciences. Grâce à cette découverte, Le Verrier devient immédiatement célèbre et va être présenté à l'empereur. Comme il n'a pas d'habit, François Arago, académicien, qui a à peu près la même corpulence, offre de lui prêter le sien. Mais, en contemplant son image dans un miroir, Le verrier s'exclame : « mais je n'ai pas de médailles ! ». Et Arago lui répond :

- Tenez, choisissez. J'ai mis les miennes, que je ne porte jamais, dans cette boite.

Il ne manqua jamais par la suite de présenter celles qui qui furent données, comme on peut le voir sur le portrait ci-dessus.

En 1854 il est nommé directeur de l'observatoire de Paris où il se comporte comme un véritable tyran. A propos des travaux et découvertes de l'observatoire il écrit :

- On ne doit pas livrer à la publicité les noms des aides-astronomes qui font des découvertes dont tout le mérite revient exclusivement au directeur, sous les ordres duquel ils sont placés.

Il multiplie les vexations, les suspensions arbitraires de traitement, renvoie deux astronome, Mathieu et Laugier, mis en place par Arago. Ceux-ci s'en plaignent au gouvernement. La polémique gagne la place publique. Le Verrier est l'exemple typique d'une personnalité psychologiquement rigide. Devant ces critiques il durcit sa position.

Finalement, quatorze astronomes démissionnent en même temps, en espérant ainsi amener le sénat à réagir. Le Verrier contre-attaque en demandant d'intervenir en personne au sénat. Mais le sénat le démet de ses fonctions le 6 février 1870. et il est remplacé un mois plus tard.

En dehors de ces aspects anecdotiques, et pour revenir, après cette digression, à cette question de l'avance du périhélie de la planète Mercure, Le Verrier imagine alors que l'effet observé puisse être dû à une petite planète, orbitant plus près du Soleil, à laquelle il donne le nom de Vulcain.

Il détermine sa masse, les paramètres de son orbite, et les astronomes tentent en vain de l'apercevoir. Il faudra l'émergence, en 1915-1916 de la Relativité générale d'Einstein pour que l'interprétation qu'en donne ce vernier mette fin à cette quête.

Il convient cependant de remarquer une chose. Si cette relativité restreinte n'était pas apparue en 1915 et si les scientifiques de cette époque avait eu l'état d'esprit de ceux d'aujourd'hui, on aurait peut-être imputé cet effet à une darkplanet, qui sait ? .

En quittant cette inadéquation de la mécanique Newtonienne aux observations, bien minime, disons-le, passons à un second point.

En 1881 Abraham Michelson né en Prusse, a 22 ans. Il imagine alors, à Berlin, un montage très astucieux qui devrait permettre de mettre en évidence la vitesse à laquelle se déplace la

Terre par rapport à un milieu qu'on appelle l'éther, où se propage ces ondes qui constituent la lumière.

On sait que la lumière est une onde, puisqu'on peut créer des interférences, etc. la mise en évidence du temps de propagation d'une onde dans un milieu est la classique image de la mesure du temps de propagation d'une onde sonore, émise par deux expérimentateurs postés sur le toit d'un train en mouvement, selon que cette onde se propage dans le sens du mouvement ou à contre-courant. Le son ne se propage qu'à 340 mètres par seconde. L'expérience pourrait très bien être réalisée et s'avérer concluante.

Michelson émigre vers les Etats-Unis. L'expérience est alors refaite avec une plus grande précision avec l'américain Morley. Cette fois, le mouvement de la Terre par rapport à l'éther, du à sa vitesse sur son orbite autour du Soleil n'est plus en cause. La vitesse de la lumière se révèle constante quelle que soit la direction considérée.

A ces deux« petits nuages gris » évoqués par Lord Kelvin nous allons en ajouter un troisième.

En cette fin de dix-neuvième siècle l'existence des atomes est encore une question de croyance. Cette thèse a ses farouches opposants. Parmi ceux-ci le chimiste français Marcellin Berthelot. Celui-ci réalise la première synthèse de l'alcool en 1854. Ses activités couvre une large palette, comprenant la politique. Il voit dans cette théorie atomique une tentative de simplification qui lui rappelle le modèle médiéval des quatre éléments. Il croît qu'il existe des substances, mais ne croit pas au discret.

Sa phrase favorite est :

- Je lutterai jusqu'à mon dernier souffle contre cette absurde théorie atomique.

Marcellin Berthelot

La France lui devra un certain retard en chimie, par rapport à des pays comme l'Angleterre et l'Allemagne. On sait que c'est le Néo-Zélandais Ernest Rutherford qui mit fin au débat en 1905, en démontrant la nature corpusculaire de la matière.

Il n'y a donc pas, en 1895, de « nuage gris » en chimie. La Mine autrichienne de Joachimstal fournit aux expérimentateurs de nombreux ays des échantillons d'une nouvelle substance, le radium. On lui a donné ce nom parce qu'elle émet un rayonnement. Mais ce phénomène n'est pas foncièrement déconcertant. D'autres corps émettent de la lumière et le phénomène prend alors le nom de phosphorescence.

Beaucoup de découvertes majeures sont le fait du hasard. Le 26 février 1896 le chimiste Henri Becquerel enferme dans un tiroir des cailloux contenant de l'uranium qui se trouve reposer sur une plaque photographique.

Henri Becquerel

Normalement, le film sensible n’est impressionné que par la lumière. Or quand on le développe, la silhouette des cailloux apparaît. Becquerel en déduit que ceux-ci émettent un rayonnement inconnu, capable de passer à travers l’enveloppe opaque dans laquelle le film était entreposé. Il qualifie le phénomène d’hyperphosphorescence et comprend que le radium émet un rayonnement de nature inconnue. Sans le savoir, Becquerel vient de découvrir la première manifestation de ce qu’on nommera la physique nucléaire.

J’ai retenu ces trois exemples de « petits nuages gris » au sens où ces phénomènes semblaient à l’époque périphériques, mineurs. Alors que chacun d’entre eux, à sa façon, constituera e point de départ de révolutions conceptuelles majeures.

Chapitre 3 :

Calculez, il n’y a rien à voir.

En 1905 Albert Einstein, âgé alors de 26 ans, montre que la lumière ne se propage pas dans un éther. Bien qu'elle se comporte comme une onde, elle correspond à quelque chose de beaucoup plus profond, à la structure géométrique de l'univers.

La personnalité extrêmement originale d'Einstein tient au fait que, tout en s'efforçant d'intégrer les mathématiques les plus avancées, il reste un fantastique physicien, totalement ancré dans les faits expérimentaux et observationnels. Il est ainsi significatif que le prix Nobel lui sera donné en 1921, non pas pour la relativité, restreinte ou général, mais pour son explication du phénomène de l'effet photoélectrique.

Le saut conceptuel que représente l'introduction de sa relativité restreinte repose sur l'idée que le temps n'est que la quatrième coordonnée d'un espace à quatre dimensions, qu'il désigne sous le nom d'espace-temps. Dans ces conditions cette quatrième dimension doit être mesurée …. En mètres, ou … les longueurs en secondes.

Avant cela, le temps semblait être de nature différente. L'espace, tridimensionnel, était étranger au temps. Tout se concentrait alors sur ce qui correspond au théorème de Pythagore :

- Le carré de l'hypoténuse est égal à la somme des carrés des deux autres côtés.

La découverte d'Einstein peut être exprimée d'une manière totalement géométrique en disant :

- Nous vivons dans une espace de Minkowski à quatre dimensions où le carré de l'hypoténuse est égal à la différence des carrés des deux autres côtés.
-

Le mathématicien-géomètre Hermann Minkowski

Explosion d'absurdité ! Cet espace contient donc des triangle rectangles qui, tout en ayant les deux côtés adjacents à cet angle droit non nuls, voient leur troisième côté se réduire à zéro.

On est alors tenté de se demander quelle image mentale ces nouveaux physiciens « relativistes » et ces mathématiciens-géomètres ont de cette nouvelle représentation de l'univers. La réponse est qu'il n'en ont pas. Ils ne « voient » l'objet de leur étude qu'à travers les équations qu'ils dessinent sur les pages de leurs articles. Une image ? Ils estiment ne pas en avoir besoin.

Quand leur interlocuteur ne peut, à son tour, porter son regard sur ces pages couvertes de hiéroglyphes, que seuls peuvent comprendre les mathématiciens, ils ne se sentent pas tenus de fournir à autrui ce qu'ils ne détiennent pas eux-mêmes : une image. On pourrait comparer leur réaction à celle du personnage de Mary Poppins.

Mary Poppins : « Je n’explique jamais rien »

Ce siècle qui débute en 1900 marque la fin de toute représentation imagée. On pourrait résumer cela par la phrase, paraphrasant celles de policiers face à un attroupement :

- Calculez, il n’y a rien à voir !

Avec sa relativité restreinte, Einstein apporte la réponse au problème posé par l’expérience de Michelson et Morley.

En 1915 il étend son modèle en posant les bases de la relativité générale. Ci-après son célèbre article :

844 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 25. November 1915

Die Feldgleichungen der Gravitation.

Von A. Einstein.

In zwei vor kurzem erschienenen Mitteilungen[1] habe ich gezeigt, wie man zu Feldgleichungen der Gravitation gelangen kann, die dem Postulat allgemeiner Relativität entsprechen, d. h. die in ihrer allgemeinen Fassung beliebigen Substitutionen der Raumzeitvariabeln gegenüber kovariant sind.

L'article d'Einstein ne novembre 1915, posant les bases de sa relativité générale Son titre : Équation de champ de la Relativité Générale.

L'espace de Minkowski était hautement déconcertant, mais il reste-ait plat, exempt de courbure.En accord avec l'idée centrale de la relativité générale :

Contenu en énergie-matière ←→ courbure

Cet espace de Minkowski ne permet de décrire la géométrie que d'espaces vides. La relativité générale est plus ambitieuse, qui entreprend de gérer toutes les régions de l'univers, des plus raréfiées aux plus denses.

Elle se résume entièrement à l'équation publiée par Einstein en 1915, dans son article : . La voici, extraite de son article de 1915 :

gesetzt ist; T ist der Skalar des Energietensors der »Materie«, die rechte Seite von (2a) ein Tensor. Spezialisieren wir wieder das Koordinatensystem in der gewohnten Weise, so erhalten wir an Stelle von (2a) die äquivalenten Gleichungen

$$R_{im} = -\kappa\left(T_{im} - \frac{1}{2} g_{im} T\right) \qquad (6)$$

Wie stets nehmen wir an, daß die Divergenz des Energietensors der Materie im Sinne des allgemeinen Differentialkalkuls verschwinde (Impulsenergiesatz). Bei der Spezialisierung der Koordinatenwahl gemäß (3a) kommt dies darauf hinaus, daß die T_{im} die Bedingungen

La formulation originale de l'équation de champ d'Einstein.

Nous n'allons pas, ici, expliquer ce que signifient les termes de cette équation. Mais nous allons fournir des éléments pour illustrer une anecdote assez savoureuse. . Au moment où Einstein s'efforce de réinterpréter le monde sur de nouvelles bases un grand mathématicien, David Hilbert, jouit déjà d'une notoriété internationale pour ses travaux, très riches et variés.

On sait qu'Einstein n'avait jamais été très à l'aise avec les mathématiques. Son génie se fond surtout sur sa compréhension très poussée des phénomènes de la physique et sa capacité de mettre en doute les connaissances de son temps. On pourrait dire qu'il a œuvré comme un pionnier en appliquant à la physique les mathématiques de son temps. Mais cette rencontre est aussi liée à celle du mathématicien Suisse Marcel Grossman, du même âge que lui, quand Einstein se voit accorder un poste à Zurich.

Marcel Grossman en 1909

Grossman fonde la société mathématique Suisse et dirigera l'école polytechnique fédérale de Zurich. Pendant de longues années il suivra les travaux et idée d'Einstein. Le modèle de la relativité générale ne peut émerger que si on manie cet outil mathématique que sont les tenseurs. C'est Grossman qui initiera Einstein à cet aspect de mathématiques. Ils cosigneront plusieurs documents, plaquettes et articles.

Il n'est pas faux, en tout cas pour la relativité générale, de dire qu'elle est née de la collaboration entre Grossman et Einstein, le premier aidant le second à formaliser mathématiquement ses idées.

A cette époque l'échange entre Einstein et Grossman représente l'exception, les mondes de la physique et des mathématiques étant pratiquement disjoints. En fait, et ceci se vérifie au long de l'histoire chaotique des sciences, les mathématiques sont toujours en avance de plusieurs décennies sur la physique. Ce qui signifie implicitement que, sur le plan conceptuel, les mathématiques progressent plus rapidement.

A cela on peut trouver une raison. Les mathématiques jouissent d'une plus grande liberté et ne sont pas tenues à cadrer avec une réalité physique ou observationnelle. Les mathématiciens ne se préoccupent pas de savoir si leurs équations auront dans le futur partie liée avec une réalité physique quelconque. Le laboratoire d'un mathématicien c'est sa feuille de papier et son crayon.

Un exemple de maths en avance sur la réalité physique est constitué par les travaux du mathématicien allemand Bernhard Riemann, pionnier dans ce monde des espaces courbes à plus de deux dimensions, auxquels il laissera son nom. Nous disions plus haut que la relativité restreinte se résumait à l'idée que la description géométrique de l'univers ne pouvait se faire qu'en faisant appel à un espace à quatre dimensions, un l'espace-temps, qui se trouvait être un espace de Minkowski.

Bernhard Riemann 1826 - 1866

Le passage à la relativité générale se traduit par l'extension du contexte géométrique en passant de l'espace de Minkowski à un espace de Riemann à quatre dimensions. L'espace de Mikowski étant un cas particulier d'espace de Riemann « plat », exemple de courbure. De même qu'un plan est un cas particulier de surface courbe, … sans courbure.

La contribution de Riemann est donc une des clé du déploiement de cette nouvelle vision de l'univers. Il développe cela dans sa thèse, en 1854 sans imaginer une seule seconde que ses travaux pourraient trouver leur emploi pour des questions d'astrophysique (en l'occurrence pour l'explication de la déviation du périhélie de Mercure, du à la courbure de l'espace).

Un grand mathématicien russe, MikaïlOstrogradsky, d'envergure internationale, commentait ces travaux en disant :

- On ne voit pas à quoi pourrait servir ces géométries d'espace courbes à trois dimensions, puisqu'il est évident que l'espace où nous vivons est euclidien.

Grâce à Grossman, Einstein trouve donc l'emploi d'outils mathématiquesde son temps.

D'emblée, les avancées mathématiques apparaissent beaucoup plus sophistiquées que ceux dont se servent les ingénieurs, comme les équations de Maxwell et de Navier-Stockes, présentées plus haut. Le mathématicien David Hilbert est un grand producteur de ces mathématiques avancées, sans savoir que ses inventions trouveront une place clé dans ce qui deviendra la physique mathématique. En effet la mécanique quantique se fonde entièrement sur ce qu'on appelle des espaces de Hilbert, éminemment abstraits.

Le mathématicien David Hilbert a 53 ans au moment où Einstein publie sa relativité générale.

Au moment où Einstein publie sa relativité restreinte, David Hilbert est convaincu d'évoluer dans un univers sans rapport avec le réel, le monde de la physique. Voici une autre anecdote, assez savoureuse. A cette époque un de ses collègues donnait chaque année une conférence dans une école d'ingénieurs, en évoquant quelques avancées dans e domaine de mathématiques. Cette année-là ce collègue est malade et on demande à Hilbert de le remplacer. Lorsqu'il prend place devant ces jeunes ingénieurs, il déclare d'emblée :

- On dit souvent que les mathématiciens et les ingénieurs ont du mal à se comprendre. C'est faux. Ils n'ont tout simplement rien à faire ensemble.

A Göttingen Einstein rencontre Hilbert et passe de longues heures à tenter de l'amener à infléchir sa position. Au fil de rencontres successives, courant sur une année, Hilbert réalise que ces outils mathématiques devraient lui permettre de créer une théorie globale des phénomènes physiques. Rappelons que la physique de cette époque se résume à deux types de phénomènes, à deux mondes. Il y a celui de l'électromagnétisme d'une part, et celui de la gravitation d'autre part. Deux autres forces, qualifiées d'interaction forte et d'interaction faible n'apparaitront que plus tard. Ainsi, à cette époque, celui qui parvientà créer un contexte mathématique englobant ces deux forces crée du même coup ce qui serait aujourd'hui qualifié de « théorie du tout ». Les mathématiques dont il se sert sont d'une part la géométrie différentielle, qui permet la manipulation des espaces courbes de Riemann et le

calcul des variations, qui a vu le jour un siècle plus tôt, dans les forges de différents mathématiciens, dont le français Joseph-Louis Lagrange (1736-1813).

Pendant que progresse la besogneuse tortue qu'est Albert Einstein, Hilbert, le pur-sang, prend sa course à larges foulées et en quelques mois rédige un long articles intitulé « Fondements de la physique » :

Die Grundlagen der Physik.

(Erste Mitteilung.)

Von

David Hilbert.

Vorgelegt in der Sitzung vom 20. November 1915.

Die gewaltigen Problemstellungen von Einstein[1]) sowie dessen scharfsinnige zu ihrer Lösung ersonnenen Methoden und die tiefgreifenden Gedanken und originellen Begriffsbildungen, vermöge derer Mie[2]) seine Elektrodynamik aufbaut, haben der Untersuchung über die Grundlagen der Physik neue Wege eröffnet.

Ich möchte im Folgenden — im Sinne der axiomatischen Methode — wesentlich aus zwei einfachen Axiomen ein neues System von Grundgleichungen der Physik aufstellen, die von idealer Schönheit sind, und in denen, wie ich glaube, die Lösung der Probleme

L'article de David Hilbert du 20 novembre 1915.

Notez la date du dépôt du manuscrit, le 20 novembre 1915 et reportez-vous à celui d'Einstein. Que remarquez-vous ? L'article d'Einstein a été déposé cinq jours plus tard. Or the contient l'article de Hilbert ? . Cette équation :

Unter Verwendung der vorhin eingeführten Bezeichnungsweise für die Variationsableitungen bezüglich der $g^{\mu\nu}$ erhalten die Gravitationsgleichungen wegen (20) die Gestalt

$$[\sqrt{g}\,K]_{\mu\nu} + \frac{\partial \sqrt{g}\,L}{\partial g^{\mu\nu}} = 0. \quad (21)$$

Das erste Glied linker Hand wird

$$[\sqrt{g}\,K]_{\mu\nu} = \sqrt{g}\,(K_{\mu\nu} - \tfrac{1}{2}\,K g_{\mu\nu}),$$

Elle porte sur un objet mathématique désigné par la lettre K. Ce tenseur, Einstein le désigne par la lettre R[1]. En combinant ces deux lignes d'équations il vient :

$$\sqrt{g}\,(R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}) = - \frac{\partial \sqrt{g}\, L}{\partial g^{\mu\nu}}$$

Le second membre, et cela correspond alors à des éléments de géométrie différentielle, peut être identifié à un tenseur multiplié par racine de g. On aura alors :

$$\sqrt{g}\,(R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu}) = - \sqrt{g}\; T_{\mu\nu}$$

Ce terme est alors en facteur à la fois sur le premier et sur le second membre. On peut l'enlever. Il vient :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = - \; T_{\mu\nu}$$

Ce qui correspond d'ailleurs à la façon dont l'équation d'Einstein se trouve formulée aujourd'hui, modulo un facteur constant au second membre, négatif, « la constante d'Einstein ». A ce stade, ce traitement suffirait pour en conclure « que c'est bien l'équation de champ d'Einstein », moins la constante cosmologique qui sera ajoutée plus tard. Toujours est-il que les propriétés de ces tenseurs font que cette équation est équivalente à :

$$R_{\mu\nu} = - (T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T\;)$$

Voilà. Il ne manque plus qu'à ajouter la constante d'Einstein, que Hilbert prend ici égale à l'unité et on obtient :

$$R_{\mu\nu} = - \,\chi(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T\;)$$

En remplaçant ces indices m et n par les lettres i et m ,vérifiez, c'est très exactement l'équation (6) publiée par Einstein selon un dépôt effectué … cinq jours plus tard !

J'espère que le lecteur ne sera pas rebuté par le fait que j'aie mis quelques équations, des plus obscures j'en conviens, dans ce texte. Disons que c'est pour apporter un peu de lumière sur un point de l'histoire des sciences, qui n'a sans doute jamais été décrit avec cette précision.

Einstein est catastrophé. Il sait que cette équation constitue un résultat très important. Au passage il vient de publier sa première solution de l'équation sans second membre,

---

[1] Flanqué de deux indices c'est le «tenseur de Ricci». Sans ces indices c'est « le scalaire de Ricci ».

quand le tenseur T est nul, décrivant le champ dans le vide entourant une masse, autour d'une étoile, et ce calcul explique l'avance du périhélie de Mercure. Il s'agit donc d'une révolution conceptuelle majeure. Et il vient de se faire voler le prix de son travail, à quelques jours près, par un homme à qui il a communiqué tous ses secrets, toutes ses idées.

Il ignorait qu'Hilbert courrait à grande vitesse vers ce résultat, vers lequel lui-même était parvenu au prix d'une démarche plus artisanale que mathématique. Les jours et semaines qui suivent sont assez agitées. Des courriers existent, entre ces deux personnages de premier plan. Finalement, la tension disparaît. Einstein écrit à Hilbert que le plus important pour lui est que leurs relations amicales ne soient as affectées. Et tout rentre dans l'ordre.

Hilbert n'a pas besoin d'attacher sn nom à cette découverte. Son palmarès est déjà des plus importants. Cette équation de champ portera désormais le nom d'équation d'Einstein, parachevant sa notoriété dans tous les pays du monde.

En 1914 la première guerre mondiale éclate. Nombre de jeunes scientifiques de talent y perdront la vie. Cela sera le cas pour le jeune Werner Boy, élève de Hilbert, sur lequel nous reviendrons beaucoup plus loin qui ira se faire tuer en France, dans une tranchée, un mois après le début du conflit.

Karl Schwarzschild est mathématicien et astronome. A cette époque il était courant que des hommes assurent ces deux fonctions. Au moment où le conflit éclate il a 42 ans et est père de deux jeunes enfants. Mais il s'engage immédiatement, par patriotisme, comme officier, et se trouve affecté sur le front de l'est.

Karl Schwarzschild.

Il a suivi avec passion l'émergence de la relativité restreinte. Recevant le journal dans lequel Einstein publie ses nombreux papiers, il a vu, au fil du temps, émerger cette fantastique équation de champ. Il a lu également l'article, publié au même moment, où celui-ci présente sa solution approchée, qui rend compte de la dérive du périhélie de la planète Mercure.

EINSTEIN: Erklärung der Perihelbewegung des Merkur 831

l'article d'Einstein de 1915 sur Mercure

Erklärung der Perihelbewegung des Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie.

Von A. EINSTEIN.

In einer jüngst in diesen Berichten erschienenen Arbeit, habe ich Feldgleichungen der Gravitation aufgestellt, welche bezüglich beliebiger Transformationen von der Determinante 1 kovariant sind. In einem Nachtrage habe ich gezeigt, daß jenen Feldgleichungen allgemein kovariante entsprechen, wenn der Skalar des Energietensors der

L'article d'Albert Einstein présentant la première solution approchée
de son équation de champ sans second membre.

En janvier et février 1916 il publie deux papiers, coup sur coup. Il s'agit des premières solutions exactes (exemptes d'approximations) de l'équation d'Einstein, dans une situation stationnaire (solutions indépendantes du temps). Dans le premier il produit l'équation qui décrit la géométrie dans e vide qui entoure une masse, une étoile. Quand il l'applique au cas du Soleil il retrouve la solution approchée publiée quelques mois plutôt par Einstein, qui suffit largement, étant donné le faible écart vis-à-vis de la mécanique newtonienne.

SCHWARZSCHILD: Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes 189

Sitzber. Deut. Akad. Wiss. (1916)

Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der EINSTEINschen Theorie.

Von K. SCHWARZSCHILD.

(Vorgelegt am 13. Januar 1916 [s. oben S. 42].)

§ 1. Hr. EINSTEIN hat in seiner Arbeit über die Perihelbewegung des Merkur (s. Sitzungsberichte vom 18. November 1915) folgendes Problem gestellt:

Ein Punkt bewege sich gemäß der Forderung

$$\delta\int ds = 0,$$

wobei

$$ds = \sqrt{\sum g_{\mu\nu}dx_\mu dx_\nu} \quad \mu,\nu = 1,2,3,4 \qquad (1)$$

Le premier article de Karl Schwarzschild.

Traduction : champ gravitationnel créé par une masse ponctuelle selon la théorie d’Einstein. La première traduction de ce papier, en anglais, ne sera disponible qu’en 1975.

Un mois plus tard il construit la géométrie à l’intérieur d’une sphère emplie d’un fluide incompressible (d’une étole où la densité est considérée comme constante). Construire cette géométrie c’est-à-dire produire une solution sous la forme d’une « métrique » qui permet de calculer toutes les trajectoires possibles de « masses témoin » à l’extérieur comme à l’intérieur de l’astre.

Imaginer que des objets puissent traverser la masse d’une étoile, voilà qui semble s’éloigner du monde de la physique. A l’époque de Schwarzschild, oui. Mais on verra apparaître plus tard des particules qui, interagissant très faiblement avec la matière sont capables de traverser des masses importantes de part en part. Donc cette solution n’est pas totalement irréaliste. Ce qui est important c’est que Schwarzschild gère parfaitement le raccord de ces solutions, à la surface de l’étoile.

Mais, ayant contracté une infection sur le front, il décède quelques mois plus tard. La communauté scientifique ne retient donc que le nom d’Einstein et le fait qu’il ait résolu le paradoxe soulevé par la trajectoire de Mercure. Ainsi se trouve dissipés deux des trois nuages identifiés par Lors Kelvin, le premier ayant été la question de la constance de la vitesse de la lumière, élucidé par la relativité restreinte introduite par Einstein en 1905, avec cette relation établissant une équivalence entre asse et énergie :

$$E = mc^2$$

L'irruption la plus spectaculaire d'une nouvelle physique est évidemment la mise en œuvre de l'énergie nucléaire sous forme de bombes A et H. Il n'est pas exagéré de dire que ce sauf est comparable à l'invention du feu.

La seconde expérience de plein air confirmant la nouvelle physique.

C'est une mise en œuvre qui implique un profond changement de paradigme. En effet, si les réactions de fusion peuvent se produire c'est parce que les neutrons peuvent pénétrer à l'intérieur des noyaux des atomes d'uranium. Ceci n'est possible que grâce à l'effet tunnel.

En effet, la mécanique quantique renonce à situer les objets, de manière déterministe. Elle se contente de leur attribuer des « probabilités de présence ». Si les neutrons parviennent à pénétrer dans les noyaux c'est parce que quand ils les frôlent il existe une probabilité non nulle pour … qu'ils soient déjà à l'intérieur.

Si et effet tunnel est évident pour un spécialiste de mécanique quantique, il marque la faillite complète du sens commun dans cette physique-là. Les Français tirant une bonne part de l'énergie électrique qu'ils consomment, ils exploitent au quotidiens cet effet tunnel, magnifiquement absurde.

Si l'homme de la rue profite au quotidien, sans en être conscient, de l'exploitation de cette physique tissée de paradoxes, il pourrait penser que le mode de la relativité n'intéresse que les spécialistes, dans leurs laboratoires, ou les astrophysiciens et cosmologistes, qui se concentrent sur des distances qui n'ont plus rien à voir avec les échelles terrestres même ou du système solaire.

C'est inexact ? La relativité générale prédit que les horloges ne donnent pas les mêmes mesures, loin de toute masse, ou à proximité de l'une d'elle. Ainsi, le temps ne s'écoule pas au même rythme à la surface de la Terre et à une certaine hauteur. Deux chercheurs américains, Robert Pound et Glenn Rebka mise cet écart minime en évidence en 1960, la différence d'altitude étant de 22,5 mètres. Je ne m'aventurerai pas à décrire le principe de la

mesure[2]. Toujours est-il que l'effet put être ms en évidence, d'abord avec une précision de 10 % puis de 1%.

Mais, là encore, il s'agit d'expériences de laboratoire. Il existe des situations où ces erreurs, minimes, finissent, en s'additionnant au fil du temps par créer des erreurs importantes. C'est le cas du système GPS. Il est fondé par tout un ensemble de satellites orbitant autour de la terre chacun contenant une horloge atomique Il est indispensable pour qu'une géolocalisation à l'aide de ce système se satellites puisse fonctionner, que toutes ces horloges donne le temps de manière significative. Il est donc impératif de tenir compte de la dérive temporelle, par rapport à une mesure du temps à l'altitude zéro L'erreur instantanée est faible. Mais si on raisonne à l'échelle de jours, de mois, d'années, si on ne tenait pas compte de cette correction, le système GPS donnerait des erreurs cumulées sur les positions, telles qu'il en deviendrait inutilisable.

Ainsi, quand vous suivez les indications du GPS de votre véhicules, vous exploitez les acquis du modèle d'Einstein, de la relativité générale.

De même que le dix-neuvième siècle a représenté le bénéfice retiré des progrès opérés en physique et en chimie, notre époque vit également sur l'acquis du second âge de la science, correspondant à une période allant de 1986 à la charnière des années soixante-dix. Depuis cette charnière des années soixante-dix nous n'avons rien fait d'autre que de développer des applications technologiques.

---

[2] Pas « spectroscopie Mossbauer.

Chapitre 4 :

Une stagnation qui s’opère à la fois dans

L’infiniment petit et dans l’infiniment grand.

Avant d'envisager cette question il est nécessaire d'évoquer à grands traits ces « quatre-vingt glorieuses ». Huit décennies le long desquelles travaux théoriques, expériences et observations se sont répondu d'une l'autre.

Commençons par le monde de l'infiniment petit.

En 1905 Ernest Rutherford apporte la confirmation de la structure corpusculaire de la matière. En ce même début de siècle ce sont les électrons dont on mesure la charge électrique et qu'on parvient à peser. Suit un démontage en règle de la matière. Pour démonter, on casse, en utilisant des accélérateurs de particules.

Durant ces décennies on ne fait état d'aucun temps mort, d'aucune latence. Les découvertes s'accumulent. Alors que depuis cinq décennies les revues de publication scientifiques axées sur une science fondamentale ne parviennent pas à remplir leurs colonnes avec des travaux crédibles et tangibles, à cette époque des découvertes extraordinaires apparaissaient, numéro après numéro, s'enchaînant à un rythme effréné.

Parfois ce sont des faits expérimentaux qui interpellent les théoriciens, lesquels ne tardent pas à les intégrer dans de nouvelles facettes de leurs modèles. A l'inverse, comme le fit en l'Anglais Dirac, le théoricien propose en 1931 l'existence de nouveaux éléments du bestiaire. En l'occurrence celui-ci propose de doubler celui-ci, chaque particule ayant son double, de charges opposées, qualifié d'antiparticule.

Paul Dirac

Cette proposition n'est pas accueillie avec beaucoup de chaleur. certain, comme Niels Bohr, n'hésitent pas à dire :

- La théorie de Dirac me semble constituer un excellent moyen de capturer les éléphants, en Afrique. En effet il suffit d'accrocher l'article à un arbre. Si un élément passeet

le lit, cela provoque en lui un tel état de stupéfaction qu'on peut alors s'emparer de lui sans difficulté.

La création d'antimatière nécessite des énergies très importantes. Heureusement pour Dirac celles-ci existent dans les rayons cosmiques. Il se créent alors toutes sortes de particules et la « chambre de Wilson[3] », qui enregistre le trajectoire dans un champ magnétique permet alors de les identifier . Assez vite un cliché révèle, à côté de la trajectoire d'un électron, celle de ce frère jumeau de charge opposée qui tourne dans a direction opposée.

Cette physique des particules, dites élémentaires, représente un bestiaire riche. Leur étude relève d'une nouvelle physique, qui est aussi celle des noyaux d'atome. Après avoir démonté ceux-ci les théoriciens et les expérimentateurs entreprennent d'essayer de démonter les constituants mêles du noyau. En 1964 un théoricien, Gell-Man, propose un modèle où le proton est constitué par un assemblage de trois « quarks », liés par une force qualifiée « d'interaction forte », où la particule véhiculant cette force est le gluon. [4]

1964 Gell-Mann

Pour briser le proton en ses constituants il faut mettre en œuvre une énergie considérable. On ne cherche plus à amener ces protons, ces noyaux d'hydrogène, à percuter une cible. On et en jeu deux boucles d'accélération où des paquets de protons tournent en sens inverse. Puis, quand l'énergie acquise atteint la valeur souhaitée, comme avec deux lignes de chemin de fer, on dérive ces flux pour amener ces photons à se percuter frontalement. Le montage ainsi utilisé prend le nom de collisionneur.

Les physiciens sont confiants. La quarks sont dotés de charges électriques fractionnaires : moins 1/3 et plus 2/3. On sait depuis longtemps identifier les particules chargées en enregistrant leurs trajectoires dans des chambres à bulles. Si les charges positives tournent à droite, les changes négatives tournent à gauche. Le rayon de giration dépend de la masse et

[3] Aujourd'hui remplacée par la « chambre à bulles »
[4] La particule véhiculant la force électromagnétique étant le photon.

de la charge des particules électriquement chargées. La photon prise permettra ainsi d'identifier les quarks.

Mais ne se produit comme prévu. I faut savoir que lorsqu'on met en œuvre de telles énergies, celles-ci dépassent de loin l'énergie de base du proton, c'est-à-dire sa masse, multipliée par le carré de la vitesse de la lumière. En tablant sur l'équivalent énergie-masse, cette énergie peut se transforme en particules matérielles, de durées de vie variables. L'expérimentateur obtient donc une gerbe de particules, issues de cette conversion d'énergie cinétique du proton en masse. Pas point de quarks. [5]

Néanmoins le modèle des quarks « fonctionne ». Il constitue aujourd'hui une partie fondamentale de ce qui est désigné sous le nom de modèle standard. Sur cette base le physiciens théoriciens ont cherché à envisager quelles particules composeraient la « soupe cosmique » en remontant plus loin dans le temps, vers des températures encore lus importantes. Les collisionneurs ont permis d'accéder aux énergies qui étaient alors censées donner naissances à ces particules.

Quelles sont-elles ?

Elles constituent un nouveau bestiaire auquel on a donné le nom de « superparticules ». Ainsi chacune des particules déjà recensées était censée posséder un « double », y compris le photons, dont la superparticule associée avait reçu le nom de « photino ».

---

[5] Les physiciens utilisent des mors grecs pour classer les particules. Ainsi « leptos » signifiant « léger », l'électron est-il un « lepton ». Le mot « baryos » signifiant « lourd », le proton et le neutron sont des « baryons ». Les mésons K et p sont aussi des baryons. Le sens du mot « hadros » nous renseigne alors sur la nature des « hadrons ». Ils sont alors « nombreux ». En effet quand la dislocation des noyaux, à l'impact est censée créer un « plasma de quarks et de gluons » ceux-ci se recombinent immédiatement pour donner ces hadrons, en tant qu'assemblages de quarks. On donne à ce processus le nom « d'hadronisation ». Instables, ces hadrons se désintègrent en donnant naissance à une cascade de produits de désintégration.

Le bestiaire des superparticules.

On notera que même les quarks se trouvent associés à des « superquarks » ! Mais rien de tout cela n'est observé, en débat d'un accroissement constat des énergies mises en œuvre ! La physique de l'infiniment petit connait donc une crise majeure, essentielle, depuis des décennies. Alors que le progrès dans ce domaine avait été entièrement focalisé sur l'accroissement de l'énergie à l'impact, avec des budgets de plus en plus importants, pharaoniques, de plus en plus de scientifiques doutent qu'un nouvel investissement en ce sens puisse engendrer de nouvelles découvertes.

Dans ce domaine il ne s'agit donc pas d'un ciel bleu dans lequel subsisteraient quelques petits nuages gris, pour paraphraser la phrase de lord Kelvin, mais du brouillard le plus opaque.

Passons maintenant au monde de l'infiniment grand.

Le dix-neuvième siècle avait ouvert la porte, au-delà du système solaire, à une astronomie quantitative avec les premières mesures de distance.

Herschel avait découvert les aspects **QUALITATIFS** de l'astronomie moderne : existence des galaxies, mouvement des étoiles, structure de la Voie Lactée, mouvement du Soleil. Le siècle suivant apportera des **MESURES** précises, les premières.

CIEL !

En faisant deux repérages précis d'une étoile de la constellation du Cygne, en août et en décembre par rapport au fond des étoiles lointaines (parallaxe), l'allemand **BESSEL**, en 1838, détermine sa distance : 11 années-lumière

61 Cygni

Terre Août

Soleil

Terre Décembre

Août

Décembre

Ne bougeons plus !

La photographie permit ultérieurement de fixer les images célestes sur la pellicule, et aussi de collecter plus de lumière pendant de longues poses nocturnes

44

Après 185, pendant les « quatre-vingt glorieuses »associées à ce domaine, entre mille neuf cent 15 et le milieu des années soixante-dix, comme dans la physique des particules, les progrès observationnels et conceptuels se répondent l'un l'autre.

La première avancée majeure est cette publication, par Einstein, en 1915, de son équation de champ, avec la première application immédiate : l'explication de l'avance du périhélie de Mercure. Très rapidement une seconde confirmation observationnelle du modèle est obtenue : celle de la déviation des rayons lumineux par les masses.

En 1912 une femme, Henrietta Leavitt, fait une fantastique découverte, qui va permettre les mesures de grandes distances.

Grâce à cette découverte le galaxies, bénéficiant antérieurement de la dénomination vague de « nébuleuses »sont identifiées à des ensembles d'étoiles, la plus proche, la galaxie d'Andromède, étant à 2,5 millions d'années-lumière de la nôtre.

La galaxie d’Andromède.

Sur le plan observationnel, la mise en œuvre de télescopes de plus en plus puissants apporte une moisson de découvertes.

La spectroscopie fournit une moisson de renseignements sur la composition des étoiles. Les mesures permettent également d'évaluer les températures[6]. En se conjuguant avec les

[6] Par l'élargissement des raies spectrales, liée à l'agitation thermique dans le milieu émettant cette lumière.

progrès de la physique des particules, la découverte des énergies dégagées par les différentes réactions de fusion, les théoriciens conçoivent des modèles d'étoiles, classées selon leurs masses. Les très nombreuses images disponibles permettent de dresser des scenarios d'évolution stellaire . Les astronomes utilisent la mesure de l'effet Doppler por évaluer es vitesse des objets.

Ce qui va permettre, dans les années vingt, à Edwin Hubble et à Milton Humason de découvrir l'expansion de l'univers ;

Ce qui est tout à fait extraordinaire c'est qu'antérieurement aux années vingt, lorsque l'instationnarité cosmique fut mise en évidence, personne n'aurait imaginé que l'univers ait pu exister autrement que tel qu'on l'observait actuellement.

Cette inconscience d'une possible évolution cosmique est particulièrement visible quand on examine attentivement l'article publié par le mathématicien David Hilbert en 1915. Comme texte n'est accessible qu'en faisant l'acquisition d'un ouvrage ou en le consultant dans une bibliothèque sous sa traduction anglaise, il est relativement peu connu, si ce n'est pas une poignée d'historiens des sciences. En ajoutant que ceux-ci ne disposent pas automatiquement du bagage mathématique qui leur permettent d'en saisir toutes les subtilités. Toujours est-il qu'Hilbert, né dans une famille protestante, ne décrit pas

explicitement la naissance de l'univers. Mais, tel que le contexte géométrique est présenté il existe une origine du temps, qui est alors d'une nature différente des coordonnées d'espace[7]. Les contenus cosmiques sont alors simplement « là », tels qu'ils se présentent à nos yeux.

Cette totale inconscience d'une possible évolution cosmique est également partagée par Einstein, qui tentera de construire un premier univers stationnaire. La force de gravité tend alors à provoquer l'effondrement de l'univers. Pour conjurer cela Einstein emprunte à David Hilbert un complément apporté à son équation, la constante cosmologique, qui traduit un pouvoir répulsif du vide.

Avant la modification apportée par David Hilbert :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} = \chi T_{\mu\nu}$$

Une fois cet ajout opéré :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \chi T_{\mu\nu}$$

Mais, très vite, l'observation met en évidence le phénomène d'expansion cosmique. Le russe Friedman modélise le phénomène en 1922 en produisant une solution instationnaire de l'équation d'Einstein.

Alexandre Friedmann 1888-1925

[7] Dans la vision cosmologique de David Hilbert le temps et une grandeur « imaginaire pure ». Ceci diffère de la vision d'Einstein selon laquelle le temps n'est qu'une des autres coordonnées de l'hypersurface espace-temps et pourrait être mesuré en mètres.

Assez dépité, celui-ci aurait déclaré :

- Si j'avais su que l'univers évoluait j'aurais trouvé cette solution avant Friedmann.

La constante cosmologique ne semble donc plus nécessaire pour décrire l'évolution du cosmos ; ce qui fera dire à Einstein que « son recours constitua la plus grande erreur de sa carrière ».

Un prêtre belge, l'abbé Lemaître, très au courant des travaux de la relativité générale, s'empare de cette idée : Si l'univers est en expansion, alors, en remontant dans le passé on doit parvenir à un instant zéro, celui de la création divine par Dieu.

Un astrophysicien anglais, Fred Hoyle, donne à nom à ce moment ; le Big Bang. Mais ce qui compte, ce sont les indices observationnels. Ceux-ci émergeront en 1965. En effet, en combinant cette idée d'un univers très dense et très chaud, dans un passé lointain, avec les données théoriques de la physique des particules on en conclut qu'avant le premier centième de seconde l'univers doit être la scène de deux réactions fondamentales, chacun étant l'inverse de l'autre . D'un côté des photons de haute énergie, correspondant aux rayons gamma, donnent naissance à des couples particule-antiparticule. Par exemple à un couple formé par un proton et un antiproton.

Synthèse d’un couple de particule à partir de photons.

Mais ces deux particules, de charges électriques opposées, s’attirent et vont aller s’annihiler un peu plus loin en redonnant des photons gamma :

Annihilation d’u coule particule-anti-particule.

Comme dans les systèmes chimiques un état d’équilibre s’établit, et dans cet état l’univers, au premier millième de seconde, est un mélange de matière, d’antimatière et de photons, tous ces composants passant leur temps à changer de nature à un rythme effréné.

Mais l’expansion joue son rôle en refroidissant le « gaz de photons ». En fait, et nous reviendrons sur ce pont plus loin, les longueurs d’onde de photons croisent en même temps que l’univers lui-même. Ces photons ne voyagent as dans un espace en expansion, ils sont cet espace. On doit imaginer une sorte de drap parcouru par des ondulations. Au fur et à mesure de l’expansion de ce drap, les longueurs d’onde suivent ce mouvement, comme illustré sur l’image ci-après :

L'extension de la longueur d'onde des photons qui suit
le phénomène de l'expansion cosmique.

Mais l'énergie véhiculée par les photons varie comme l'inverse de leur longueur d'onde. Donc, passé ce premier centième de seconde ces photons ne sont plus capables de compenser la disparition des paires particule-antiparticule. Ces couples vont alors disparaître en donnant des photons. Ceux-ci peuvent être considéré comme la « cendre » de cette réaction d'annihilation matière-antimatière.

L'expansion poursuivant son œuvre les longueurs d'onde de ces photons vont continuer de s'étirer. A l'époque actuelle leur longueur d'onde se chiffre en centimètres.

La lumière visible correspond à des longueurs d'onde se chiffrant en microns, en fractions de millièmes de millimètres. Au-delà, pour des longueurs d'onde plus courtes, au-delà ce que qui est visible, c'est-à-dire la lumière violette, se situe l'ultraviolet. Puis, au-delà encore, le rayonnement X. Et en poussant encore plus loin de rayonnement gamma.

A l'inverse, pour des longueurs d'onde plus grandes, au-delà du rouge, la dernière couleur du spectre du visible, se tient l'infra-rouge, plus la gamme des ondes radio. Les ondes dont les longueurs d'onde se chiffrent en centimètres, les ondes centimétriques, sont des ondes radio.

Dans les années soixante les américains avaient rejoint les russes en mettant des objets en orbite. Il leur vint alors en tête de placer en orbite autour de la Terre un ballon en mylar recouvert d'un film métallisé réfléchissant. L'idée était alors d'utiliser cet objet comme réflecteur d'ondes radio, de manière à faciliter les communications à très grande distance.

Le ballon-satellite Echo. Ici dans un hangar servant à abriter des dirigeables.
La taille des personnages donne l'échelle.

Le récepteur des ondes radio avait la forme d'un grand cornet acoustique, orientable et avait été conçu par deux scientifiques américains, Robert Wilson et Arno Penzias, responsables de l'ensemble du projet.

L'antenne réceptrice du projet Echo

Il est très fréquent que des découvertes importantes soient le fruit du hasard. En effet, ni Penzias, ni Wilson ne se préoccupaient de cosmologie ou de physique des hautes énergies. Ils furent très surpris de constater que leur antenne captait un signal radio très net, alors que le ballon écho n'avait même pas été mis en place sur son orbite. Tout fut alors envisagé, y compris qu'un couple de pigeons ayant établi leur nid dans l'antenne puisse être responsable de ce phénomène. Les pigeons furent donc capturés et relâchés loin de l'antenne.

LE RAYONNEMENT FOSSILE

En 1964, dans le New Jersey

Alors, les gars ? Vous avez pu éliminer ce parasite radio

Comme il fallait s'y attendre, ils revinrent aussitôt dans ce qu'ils considéraient comme leur domicile conjugal. Penzias et Wilson employèrent alors les grands moyens. Les pigeons furent tués et mangés.

Mais la réception du parasite, dans la gamme des ondes centimétrique se maintint[8]. Plus encore, cherchant à localiser la source de cette émission, les deux scientifiques braquèrent leur antenne dans toutes les directions. Mais non seulement la réception continua, mais l'intensité du signal était la même, quelle que soit la direction retenue. Finalement l'explication fut apportée par un théoricien de Princeton, un certain Dicke, qui leur dit :

- Félicitation les gars. Vous venez de faire une extraordinaire découverte. Vous venez d'apporter la preuve de la théorie du Big Bang.

[8] L'émission de rayonnement émanant d'un « gaz de photons » à une température de rayonnement T conduit à une longueur d'onde, exprimée en mètre = 0,0144/T. Aujourd'hui des mesures précises chiffrent cette température de rayonnement à 2,7 °K. Ce qui correspond alors un une longueur d'onde de 5,3 cm.

A l'aube des années soixante-dix, lors que j'entrais comme chercheur à l'observatoire de Marseille, le problème central de la cosmologie était d'opérer un choix entre les trois

solutions possibles découlant de la construction de la solution instationnaire trouvée par Friedmann. Le critère se situant autour de la valeur de la densité moyenne de matière dans l'univers. J'ai situé ce problème à la fin d'une bande dessinée, le Geometricon, et c'est donc sous cette forme que je vais illustrer ce point.

La valeur critique de la densité est 10^{-29} gramme par centimètre cube. Un autre dessin permet de comprendre comment fonctionne le modèle de Friedmann. Imaginons deux patins à roulette portant chacun un aimant. Tel qu'ils sont initialement placés ces aimants présentent, face ç face, des pôles opposés. Donc ils s'attirent et cette attraction représentera la force de gravité. A l'instant initial de cette expérience de pesée on dispose entre eux un ressort qui leur donnera une impulsion en les lançant dans des directions opposées.

Patins à roulettes équipés d'aimants et d'un ressort.

Lorsqu'on libère les patins ils bénéficieront d'une impulsion communiquée par le ressort. Tout dépend alors de la force des aimants. Trop faible, leur action deviendra vite négligeable et les patins (en l'absence évidemment de tout frottement) continueront leur route à vitesse constante. Si au contraire cette force est importante, après s'être éloignés à une certaine distance, ils retomberont l'un sur l'autre à une vitesse accélérée, recomprimant le ressort, qui qui le projettera de nouveau à distance, etc. On obtiendra ainsi un système oscillant. 1

Entre les deux, une situation intermédiaire où l'action attractive des aimants n'est jamais négligeable, mais n'est pas non plus suffisante pour annuler leur vitesse et les faire retomber l'un contre l'autre .

Remplacez la force des aimants par celle de la gravité, pendant de la densité de matière génératrice d'une attraction et vous aurez les trois modèles de Friedmann. A la fin des années soixante la recherche de la détermination de la densité moyenne dans l'univers était au cœur des préoccupations des cosmologistes. A cette même époque consensus était apparu, les spécialistes de cosmologie s'accordant à penser que la constate lambda, dans l'équation de champ, devait être, sinon nulle, du moins négligeable. On verra que la suite des évènements devait les amener à réviser sérieusement leur position sur ce point précis.

Revenons sur cette position, de Lord Kelvin qui, à la fin du dix-neuvième siècle pensait que le panorama scientifique était un beau ciel bleu, ou ne subsistaient plus que quelques petits nuages gris. Revenons alors sur cette découverte faite par Penzias et Wilson, de cette

cendre cosmique. Comment se fait-il que cette annihilation n'ait pas été complète, ne laissant qu'un univers peuplé de photons ? Il reste que nous sommes bel et bien là. L'observation amène à conclure que cette matière qui a survécu, formant les galaxies, les étoles, les planètes, nous, ne représente qu'une particule de matière sur un milliards. Mais alors, dans ces conditions, où est passé a quantité d'antimatière équivalente ?

Tout fut tenté pour tenter de découvrir où se cachait cette antimatière cosmologique primordiale. On alla jusqu'à envisager que cette séparation se soit effectuée, sans préciser comment, au niveau de galaxies. Il devait donc exister des galaxies constituées d'antimatière. Ces galaxies contiendraient des anti-étoiles, constituées d'anti-atomes d'hydrogène, d'hélium et autres composants. Autour de ces anti-étoiles orbiteraient des antiplanète, etc.

Ces objets n'émettraient pas d'antiphotons, mais des photons que nos télescopes pourraient alors capter et qui ne différeraient en rien de ceux que nous avoient les étoiles constituées de matière, et on d'antimatière.1 En effet le photon est le seul composant du bestiaire des particules qui n'ait pas son complément. Toutes les particules se définissent par un certain ensemble de nombres quantiques, qui peuvent prendre les valeurs

$$(- 1 ; 0 ; + 1)$$

Sa symétrie matière-antimatière consiste à inverser tous les nombres quantiques. Le photon a une particularité : tous ses nombres quantiques sont égaux à zéro. Or plus zéro c'est la même chose que moins zéro.

L'antimatière ayant une masse positive et étant auto-attractive, tout ceci semblait scientifiquement possible.1 En sachant que si des anti-êtres conscients habitaient ces antiplanètes, toute rencontre entre eux et nous serait à jamais impossible, sous peine d'annihilation mutuelle immédiate.

Mais il s'avéra que les collisions entre galaxies étaient des phénomènes courants. Or si une unique rencontre entre une galaxie de matière et une galaxie d'antimatière s'était produite quelque part dans l'univers, le signal émis sous forme de rayonnement gamma serait perçu, avec nos instruments, même s'il était émis aux confins de l'univers connu.

Collision de deux galaxies.

On en déduisit donc que cette antimatière cosmologique échappait purement et simplement à l'observation. Où était-elle passée ? Qu'était-elle devenue ? Personne n'en avait la moindre idée.

Mais c'est là que vous devez prendre conscience d'un précepte qui est celui des scientifiques. Dans toutes les langues on trouve l'équivalent du proverbe :

Ce que je ne sais pas ne m'échauffe pas[9].

En transposant cela dans le monde de l'astronomie et de la cosmologie ceci devient :

Ce que je n'observe pas ne m'échauffe pas.

En effet, constatez-vous la trace d'une préoccupation de cette non observation d'antimatière primordiale au sein de la communauté scientifique ? Pas vraiment. La question est traitée en quelques lignes dans tous les ouvrages de vulgarisation, c'est tout.

Point non plus d'articles éclairants dans les revues scientifiques spécialisées. Point de financement de programmes de recherche. Quand un laboratoire ou une université entreprend de créer un colloque sur un sujet donné, tout commence par un « call for papers ». Peut-on alors imaginer que se tienne un colloque sur cette question de l'antimatière primordiale ? Il n'y en a pas, tout simplement parce que c'est un « non-sujet »[10], que personne n'a rien à dire, rien à proposer, si ce n'est le regretté russe Andréi Sakharov dont il sera question plus loin.

Continuons cette exploration des découvertes qui ont marqué l'avant-guerre et l'immédiat après-guerre.

[9] Le traducteur devra rechercher l'expression équivalent dans la langue cible.

[10] Nous verrons plus loin que ce sujet n'est pas le seul dans soin cas. A question du Dipole Repeller est aussi passée sous silence par la communauté des scientifiques, alors qu'il s'agit d'une découverte majeure.

Les modèles de la physique nucléaire ont impulsé la compréhension du fonctionnement des étoiles. Au dix-neuvième siècle les hommes savaient que les petites lumières scintillantes qui parsemaient le ciel étaient d'autres soleils. L'exploitation du phénomène du parallaxe avait permis une estimation de la distance à laquelle se situaient des étoiles les plus proches, dont l'énormité en avait surpris plus d'un. Comme le Soleil dispensait son énergie sur Terre la question qui hantait les physiciens était « comment produit-il son énergie ? Certains avaient même imaginé que cette énergie pouvait provenir de la combustion … du charbon !

On rappelle à ce sujet une anecdote assez savoureuse :

Les modèles théoriques s'affinant les astrophysiciens avaient compris que, selon leur masse, les étoiles connaissaient des destins fort différents. Au début des années trente un américain d'origine suisse, Fritz Zwicky, prédit qu'au-delà d'une certaine masse[11] les étoiles devaient connaître des fins catastrophiques, explosives et il donna à ce phénomène le nom de supernova. L'idée fut accueillie avec le plus grand scepticisme. Têtu, Zwicky entreprit de traquer le phénomène, qui donnait à ces étoiles une luminosité si forte qu'elles signalaient

[11] Au-delà de 8 masses solaires.

leur présence, fugace (aux échelles de temps cosmiques, s'entend. Cette excursion de luminosité se maintient pendant quelques mois).

Fritz Zwicky en observation.

Zwicky compara donc un grand nombre de photographies de galaxies jusqu'à ce qu'il décèle sur l'une d'elles une tache lumineuse révélatrice. Bien sûr, au début, ses collègues se moquèrent de lui en lui disant qu'il ne s'agissait que de défaut du support photographique. Mais les exemples s'accumulèrent et il fallut bien contenir que dans une poignée de galaxies, des sources de lumière extrêmement puissantes étaient soudain apparues, qui avaient ensuite disparu. La photographie suivant montre une photo de la galaxie NGC 4526, prise en 1994, sur laquelle on décèle la présence d'une supernova, sur la gauche, spot lumineux qui disparut au bout de quelques mois.

Cette supernova, e bas et à gauche, apparue en 1994,
fait partie d'une des bras de cette galaxie, peu visible.

Ici nous devons noter un point essentiel des observations astronomiques. Une galaxie comme la nôtre contient deux cent milliards d'étoles. Et il y a un nombre énorme de galaxies dans l'univers. Ainsi, si tel objet existe, ou si l'existence de tel phénomène est conjecturée par un scientifique, il est possible qu'on peine à en trouver un premier exemple. Mais ensuite, le nombre d'objets ou le nombre de ces évènements, s'ils existent bel et bien, croitra exponentiellement. Le phénomène des supernovæ en est un exemple typique. Quand les premières furent découvertes, on leur donna des noms. Aujourd'hui on en a décompté des dizaines de milliers.

Zwicky fut un visionnaire, qui avait une perception très fine d'un grand nombre de mécanismes à l'œuvre dans a nature, et qu'i savait conjuguer. Dès ce début des années trente, au cours d'une conférence mémorable, il décrit tout le scénario de la supernova. En panne de carburant de fusion, ces étoiles massives d'effondrent soudain sur elles-mêmes en quelques millièmes de seconde. Au cœur de l'étoile se trouve une sphère de fer. Les réactions de fusion se succèdent, dans les étoiles massives, donnant naissance à des atomes de plus en plus lourd, jusqu'au fer.

Structure interne d'une étoile massive. En bleu, son cœur de fer.

Le fer, c'est la cendre de la réaction de fusion. La cendre, ça ne brûle pas, c'est-à-dire qu'on ne peut pas en extraire de l'énergie. Zwicky calcule alors que cette implosion de l'étoile doit se traduire par une compression de cette sphère de fer, telle que ses atomes se trouvent disloqués en leurs composants, protons, électrons et neutrons.

Si Zwicky peut envisager un tel scénario c'est parce que, précisément, le neutrons vient d'être découvert, en 1932, par un certain James Chadwick, un britannique, élève de Rutherford (découvreur des premiers noyaux d'atomes en 1905). Et là, vous tombez sur quelque chose d'extraordinaire : quand une découverte expérimentale dynamise immédiatement le progrès du modèle théorique. Un phénomène qui est totalement absent dans le monde entier, depuis des années soixante-dix, où les découvertes expérimentales effondrent, l'une après l'autre, les certitudes de théoriciens.

C'est effectivement Zwicky qui imagine que puisse se former, à l'issue de cette fantastique compression, un astre singulier, l'étoile à neutrons.

Etoile à neutrons, structure interne :

1 – Fer
2 – Protons, neutrons, électrons.
3 - Neutrons, protons, mésons
4 – Neutrons

Là encore se pose la question de l'existence de tels objets dans l'univers. La confirmation ne se produisait qu'en 1967. A cette époque l'astrophysicien Anthony Hewish et son assistante Jocelyn Bell détectent un signal radio pulsé à l'aide du premier radiotélescope installé, à l'écoute du cosmos.

Effectivement cette émission d'ondes radio provient de la rotation extrêmement rapide des pulsars, qui est couramment de l'ordre de mille tours par seconde. Leur champ magnétique est aussi extrêmement intense. Et un champ magnétique tournant engendre des ondes radio.

Il nous faut maintenant recenser, à l'aube des années soixante-dix, ce qui, déjà, ne parvenait pas à entrer dans le modèle cosmologique.

En 1963 on découvre le phénomène des quasars[12]. Leur découverte ne fut possible que parce qu'un chercheur osa envisager une chose absurde : que le centre d'une galaxie puisse se comporter comme une source de petite dimension, qui émette à elle seule autant d'énergie que la galaxie toute entière, c'est-à-dire des centaines de milliards de fois plus émissive que les étoiles qui a composent. Une histoire qui montre que pour qu'une découverte soit possible il faut parfois que le scientifique mettre de côté la barrière de son scepticisme.

[12] Un mot issu de la contraction de « quasi stellar objets », « objets presque stellaires.

LES QUASARS

Observatoire de Pasadena (USA) 1960

Le professeur Jesse Greenstein reçoit l'étudiant Thomas Mattews

Qu'est-ce que c'est que cela ?

... Jamais vu un spectre pareil ?..

Un spectre tout à fait étonnant, ne trouvez-vous pas, Thomas ...

Il y a six raies bizarres, complètement dans le rouge. Et ça vient d'une étoile tout à fait minable ...

Cela fait un paquet d'années que j'analyse des spectres. Aucun corps n'émet comme cela !

Comme c'est complètement dans le rouge, si c'était l'effet Doppler ? Par exemple de l'hydrogène avec une vitesse de fuite énorme ?

Thomas ! S'il avait une telle vitesse de fuite, il serait alors très loin, selon la loi de Hubble, qui dit que cette vitesse est proportionnelle à la distance. Si cela était, cette poussière minuscule 50 000 fois plus petite que la Voie lactée, émettrait 100 fois plus d'énergie qu'elle !

Vous pouvez disposer...

moi, pour ce que j'en disais...

que connaît-il à la spectroscopie ? Il est radioastronome

UN AN PLUS TARD

Maarten Schmidt :

Hey, Jesse, tu vois ce spectre d'un de ces objets bizarres, "quasi stellaires", ces **QUASARS**, détectés il y a un an.

oui, Maarten

il est d'un calme ce hollandais...

Tu vois ce spectre de l'hydrogène

Tu superposes et tu fais glisser vers le rouge

Ils sont **IDENTIQUES**

→Au moment où j’écris ces lignes, plus de soixante années se sont écoulées, et personne n’a le moindre début d’explication d’un tel phénomène.

Quoi d’autre ?

Au début des années soixante-dix des mesures plus précise des vitesses d’orbitation des objets dans les galaxies commencent à arriver. Les étoiles dans les galaxies, ont des trajectoires proches de cercles. On déduit donc l’état d’équilibre du fait que la force centrifuge doit être équilibrée par la force de gravitation. Or c’est très loin d’être le cas :

La force de gravité, déduite de la distribution de la masse dans la galaxie, flèche blanche, est 5 fois plus faible que la force centrifuge, flèche rouge, qui s'exerce sur les étoiles.

Les astrophysiciens en ont déduit que les galaxies devaient contenir une masse échappant à l'observation. Tout fut tenter pour tenter d'identifier cette masse manquante, à que l'on finit par désigner sous le nom de matière sombre.

La force de gravité supplémentaire, flèche verte, imputée à une matière sombre de nature inconnue.

Celle-ci modifiait dès lors totalement l'ensemble du modèle cosmologique, avec un contenu général singulièrement dégradé :

En bleu : le pourcentage de matière sombre.
En jaune : le pourcentage de matière observable.

Cette description du contenu de l'univers ne serait valable que si ce, ou ces composants invisibles pouvait être identifiés. Or à ce jour il n'existe aucun modèle de matière sombre et aucune expérience de détection de celle-ci n'a fonctionné.

Le panorama des connaissances scientifiques commence à sérieusement s'obscurcir.

La solution de l'équation d'Einstein, trouvée par le Russe Friedman, conduisait à trois types de solutions possibles, selon que la valeur de la densité moyenne de l'univers était inférieure, égale, ou supérieure à une certaine valeur[13]. Pensez au modèle des patins à roulette lancés par un ressort. Ils correspondent aux trois courbes suivantes.

Courbe 1 : après une expansion maximale, l'univers s'effondre sur lui-même.
L'espace est censé avoir une courbure positive.

[13] 10^{-29} gramme par centimètre cube.

Courbe 2 : Assez vite la gravitation cesse de jouer un rôle et l'expansion de l'univers s'effectue alors linéairement vis-à-vis du temps. La courbure de l'espace est alors négative.

Courbe 3 : Situation intermédiaire d'une expansion parabolique.
La courbure de l'espace est nulle. L'espace est « plat » ;

Mais ces trois solutions donnaient le même comportement, près de l'origine du temps. On y trouve un début d'expansion extrêmement violent. Le fait que la tangente à la courbe, à l'origine, soit verticale indique que les particules, en t = 0 s'éloignent les uns des autres à une vitesse infinie. Donc supérieure à la vitesse de la lumière.

t_o représente le moment actuel. Seules les parties de courbes de gauche peuvent être confrontée à des données observationnelles. Les parties de droite ne sont que spéculatives.

S'agissant des données venant du passé, jusqu'où est-il possible de remonter ?

Etant donné le temps que met la lumière à nos parvenir, les observations nous permettent ainsi d'avoir accès à une partie du passé de l'univers. Comme l'univers est en expansion l'effet Doppler entraine un « glissement vers le rouge de la lumière captée. Les instruments d'optique dont nous disposons ne peuvent opérer dans toutes les longueurs d'onde. Au-delà du rouge, on trouve d'abord ce qu'on appelle le proche infrarouge. Nos rétines ne peuvent capter cette lumière, mais des télescopes spatiaux comme le télescope Hubble étaient équipés d'instruments sensibles à ce type de rayonnement. [14]

Télescope spatiale Hubble.

On a alors produit des images « en fausses couleurs » en équipant ces lointaines galaxies d'une couleur rouge pour que, sur les clichés, nous puissions les voir.

[14] La longueur d'onde la plus grande que l'œil humain peut percevoir est de 0,78 millième de millimètre ou microns. Le télescope spatial Hubble est équipé d'une caméra capable d'enregistrer des images correspondant à une longueur d'onde allant jusqu'à 2.4 microns, ce qu'on appelle l'infrarouge proche.

Quand on est face à une belle photo de galaxies on n'imagine pas qu'il a fallu capter des photons pendant des heures pour la constituer. Et, pour les télescopes terrestres, ces temps de prise de vue se limitent à la nuit.

Plus les objets sont loin et plus faible est la lumière que nous parvenons à capter. Grâce à ses capacités exceptionnelles il a été possible d'obtenir, grâce au télescope spatial Hubble de le braquer, en 1995, dans une direction du ciel pendant 10 jours consécutifs. L'image obtenue combinait les données de plusieurs « rétines » sensible à des longueurs d'onde allant jusquà 0,8 micron, très à dire très peu au-dessus de la sensibilité de l'œil humain. . Ca après l'image retravaillée de manière à ce que l'œil humain puisse apprécier toutes les données. Le champ correspond à un bouton de chemise observée à 25 mètres. L'image montre 3000 galaxies.

Le « champ profond », photographié par Hubble en 1995

Mais l'exploration optique du ciel butte sur la possibilité limitée des télescopes spatiaus d'observer dans l'infrarouge. cette limitation est aussi celle de « voir dans le passé ». Ce fut la mission du nouveau télescope spatial James Webb, principalement conçu dans ce sens.

Le télescope spatial James Webb

Pour étendre ses capacités d'observation dans l'infrarouge il a été nécessaire de l'équiper d'une suite de quatre écrans protecteurs pour le protéger, non seulement du rayonnement émis par la Terre, mais du rayonnement émis par ses propres appareils, assurant son fonctionnement, et disposés sous ces écrans protecteurs, non visibles sur cette image d'artiste. Son miroir déployable, constitué de 24 miroirs hexagonaux, offre aussi une surface de captation plus importante que celle du télescope Hubble.

Hubble et James Webb : rapport de surface des miroirs : 6.2

L’écran protecteur du télescope James Webb pourrait couvrir un terrain de tennis.

Ces protections permettent au télescope spatial James Webb d’avoir accès à des longueurs d’onde infrarouge allant jusqu’à 28,5 microns. Ces capacités permettent alors à cet instrument d’avoir accès à la lumière émise il y a 13,4 milliards d’années, émanant de galaxies situées à 13,5 milliards d’années-lumière, qui sont censées appartenir à l’univers quand celui-ci n’avait que 300 millions d’années[15].

Z13, la plus vieille galaxie, à 13,4 milliards d’années-lumière.

Cette couleur rouge est une « fausse couleur » puisque la véritable image se situe dans l’infrarouge. On verra plus loin les surprises qui ont émergée d cette exploration de l’adolescence de l’univers.

[15] Et cela correspond effectivement à l’image obtenue de « Z13 », la plus vieilles galaxie dont l’image nous soit parvenue (en 2022) ainsi nommé parce que z correspond au rapport des longueurs d’inde.

Au-delà il faudra envisager des moyens d'observation encore plus performants, pour aller encore plus loin dans les grandes longueurs d'onde, tenter de capter des images de galaxies en formation.

Mais il existe d'étranges « instruments d'optique » que sont les radiotelescopes. Ils ne sont finalement pas différents des télescopes optique, à la différence que leurs miroirs ne sont pas constitués de verre mais d'une surface grillagée, la taille des mailles correspondant aux longueurs d'onde considérées. Eux-aussi font converger le rayonnement ainsi capté, non plus sur des plaques photographiques, mais sur des cellules sensibles à ces longueurs d'onde.

Parabole d'un radiotélescope.

En fait, il y a déjà bien longtemps que les images données en optique ne se forment plus sur les antiques plaques photographiques, mais sur des systèmes CCD.

L'intérêt des radiotélescopes est qu'ils plongent immédiatement dans un passé plus lointain, associé à des longueurs d'onde plus grandes. Dans ces conditions, quelle est la limite ? Ne serait-ce pas possible d'imaginer des radiotélescopes immenses, dotés de mailles d'une dimension d'un mètre, voire plus, permettant de plonger encore plus loin dans le passé ?

La réponse est non. Il existe une limite pour cette remontée dans le passé, qui correspond à un âge de l'univers de 380.000 ans. Antérieurement à cette époque la température du milieu cosmique est supérieure à 3000°. Donc celui-ci est totalement ionisé. Si nous parvenons à capter des images de l'univers, postérieures à ces 380.000 ans c'est parce que l'univers, désionisé, est alors extraordinairement transparent. E effet les photons

interagissent peut ales les électrons liés aux atomes. Par contre, quand le milieu est ionisé, il est alors riche en électrons libres, qui interagissent alors fortement avec les photons.

Le milieu n'est alors pas opaque, mais translucide. Les photons, capturés par les électrons libres sont aussitôt réémis. Mais le message est alors perdu. Placez une page de journal derrière la vitre dépolie d'une cabine de douche. Dès que vous éloignez la page de la vitre, elle cesse d'être lisible. De même nous ne pouvons recevoir aucune information en provenance de l'univers, quand il est âgé de moins de 380.000 ans. Le « visage » qu'il nous offre alors est celui d'un plasma doté d'une température uniforme de 3000°K. Comme l'expansion distend l'univers d'un facteur mille, ce « visage de l'univers primitif »ne peut alors être capté que par des radiotélescopes travaillant dans une longueur d'onde centimétrique.

A l'aube des années quatre-vingt-dix un satellite a été lancé, dans le but d'en savoir plus sur cet état de l'univers primitif.

On sait depuis des siècles qu'on peut présenter une image de la surface complète d'une sphère en utilisant ce qu'on appelle le système de projection de Mercator :

L'intégralité de la surface de la sphère terrestres à l'intérieur d'une ellipse.

Reportons-nous maintenant aux courbes évoquant, selon les modèles de Friedmann, le comportement de l'univers dans sa prime enfance. Les particules qui ne composent s'éloignent les unes des autres à une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière. On représente autour de chacun d'elles une sphère, dont le rayon H, appelé « horizon cosmologique », croit linéairement en fonction du temps. Le dessin ci-après montre que, dans ces conditions, les sphères ne s'interpénètrent que plus tard ans le passé. Il existe toute une phase où les différentes régions de l'univers ne peuvent « communiquer », c'est-à-dire échanger de la quantité de mouvement et de l'énergie.

Il est clair que pendant toute la période t < th
les « bulles-horizon », de rayon H, ne peuvent s’interpénétrer.

C’est parce que les molécules d’air de la pièce où je me trouve échangent à un rythme élevé de la quantité de mouvement et de l’énergie, que la pression est la température dans ce volume sont les mêmes partout. Ces interactions entre régions adjacentes garantissent l’homogénéité du milieu. 1

Or l’image de l’univers au temps t = 380.000 ans émerge de cette période où aucune interaction n’avait pu se produire entre régions voisines. On s’attendait donc, en capturant ce « visage » de l’univers primitif en 1989, celui de son CMB[16]à l’aide d’un satellite COBE[17] , à se retrouver face à un milieu très inhomogène. Ce satellite a été équipé de manière à ne capter que ce type de rayonnement. Il ne « voit » donc ni les étoiles, ni les galaxies.

[16] CMB : CosmicMicrowave Background.
[17] COBE : CosmicMicrowave Background.

Le satellite COBE, 1989.

L’image obtenue plonge les i dans la perplexité. l’univers, à t = 380 00 ans apparaît homogène au cent millième près :

La remarquable homogénéité de l’univers à t = 380,000 ans

Ça n’est pas exactement cette image que les médias scientifiques présentent. En fait ces données sont avant tout enregistrées par un ordinateur. Il devient donc possible de mettre en œuvre un programme qui fait ressortir la moindre de ces inhomogénéités, signale par un codage de couleur : Ce qui suit n’est pas l’image obtenue à l’aide du satellite COBE, mais celle, beaucoup plus précise, obtenue en 2009 par le satellite Planck.

L’image de la sphère céleste à t = 380,000 ans, après
accentuation des inhomogénéités par ordinateur.

En se rappelant que cette représentation est celle qui permet de présenter toute la surface de la sphère sur une seule image. Sans cela l’aspect serait celui-ci :

Les inhomogénéités, sur la sphère céleste ;

Ce qu’il faut retenir, c’est cette extrême homogénéité de l’univers à t = 380,000 ans Ce qui constitue un nouveau nuage dans le panorama de la cosmologie. A cela il convient de tenter de fournir une explication. Le russe Andréï Linde fournit la sienne. Selon lui l’univers aurait connue, à t = 10^{-33} seconde une fantastique dilatation d’une facteur 10^{26}.

L’image de l’inflation, qui s’est instaurée dans toutes les représentations graphiques de l’évolution de l’univers, à but didactique.

Cette expansion aurait eu plusieurs effets.

- Elle aurait aplati toutes les inhomogénéités qui auraient plus être présentes avant que ce phénomène ne survienne.

- Elle annihilerait au passage toutes les courbures. Ainsi le seul modèle cosmologique à considérer est, au sein des trois modèles de Friedmann, celui où la courbure est nulle et où la loi d’expansion correspond à une parabole :

L’expansion parabolique, « conséquence » du processus de l’expansion.

Pour que cette expansion ait lieu il faut que les différentes particules se repoussent très violemment les unes les autres. l faut donc que se manifeste, à cette époque reculée, un champ de force, qui disparaîtra aussitôt après. Or qui di champ de force dit particule véhiculant cette interaction. On lui donne un nom, c'est l'inflaton.

La meilleure définition de l'inflaton, à ce jour.

Plus de trois décennies se sont écoulées et il existe autant de modèles d'inflatons que de chercheurs s'étant attachés à le définir. On s'est contenté d'envisager plusieurs schémas d'inflation. Cela a donné lieu au concept de baby universes ou de multivers. Selon leurs auteurs ce phénomène inflationniste pourrait avoir donné naissance à une infinité d'univers, ayant chacun leur propre rythme d'expansion. Des baby universes voisins d'où nous ne pourrions au passage plus capter la moindre information, les plus proches, adjacents, se situant au-delà de l'horizon cosmologique ct.

Les « baby universes ».

Vous l’avez compris. Ceci représente une complète dégradation du discours scientifique, qui ne se conjugue désormais plus au conditionnel. Jamais l’expression « faire prendre des vessies pour des lanternes » n’a été plus adaptée à ce type de discours.

Mais, vous l’avez remarqué, le discours des spécialistes de cosmologie e d’astrophysique est à géométrie variable. Il s’adapte selon les données du moment. La communauté scientifique produit alors un modèle qui est qualifié de « standard » . Cela signifie qu’il est considéré comme étant le plus crédible, par la majorité des scientifiques. Au début des années quatre vingt dix, l’image s’est stabilisée en s’appuyant sur trois idées directrices :

- *L’univers aurait connu dans son très lointain passé une fantastique expansion, sous l’action d’une force hypothétique de nature inconnue.*

- *L’univers contiendrait deux types de matières. Celle que nous observons et une seconde matière, quantitativement cinq fois plus importante, mais dont nous ignorons tout de sa nature.*

- *L’évolution du cosmos, majoritairement déterminé par son contenu en matière sombre, correspondrait à une loi parabolique, une des trois solutions de Friedmann, de l’équation d’Einstein où la constante cosmologique est, sinon nulle, négligeable.*

Mais dès le début des années quatre vingt dix les astronomes améliorent leurs mesures du phénomène de l’expansion cosmique, à très grande distance, en se référant à des objets dont les magnitudes sont proches d’une magnitude standard, les supernovæ de type IA.

Après mûre réflexion la communauté scientifique décide de valider les travaux de trois scientifiques, Saül Permutter, Brian Schmidt et Adam Riess, qui sont récompensés en 2011 par un prix Nobel. Qu’à cela ne tienne ! Le principal outil scientifique des cosmologistes d’aujourd’hui, c’est Photoshop :

L’univers, recréé grâce à Photoshop.

On remarquera que des chiffres ont été améliorés, en suivant ce que préconisait Lord Kelvin : « ajouter des chiffres après la virgule ». Ainsi l’âge de l’univers n’est plus 13 milliards d’années, ou 13.7 milliards d’années, mais 13.77. La dernière image captée de l’univers ne correspond plus à 380,000 ans mais à 375,000 ans. On verra plus loin comment les premières images captées par le télescope spatial James Webb ont rendu ces pseudo-précisions singulièrement illusoires.

Que devient alors notre dynamique d’expansion cosmique et à quoi ce phénomène pourrait-il être imputé ? Vite, ressortons la constante cosmologique du grenier où nous l’avions remisée. En lui conférant une valeur positive ou négative on traduit à volonté un « pouvoir répulsif du vide » comme son pouvoir attractif. En choisissant le bon signe

l'équation d'Einstein conduit alors à une loi l'expansion qui correspond à une fonction exponentielle du temps, en extrapolant dans un futur très lointain. Voilà donc l'équation dont tout découle, rééquipée de sa constante cosmologique, représentée par la lettre grecque lambda, dont elle avait été privée pendant plus d'un demi-siècle.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \chi T_{\mu\nu}$$

Nous avons :

0 t

Pilotage de l'expansion cosmique par la constante cosmologique :
Une expansion exponentielle en fonction du temps.

La courbe parabolique : disparue, oubliée, dans les poubelles de l'histoire des sciences. Le trait vertical figure le présent. A sa gauche, la seule chose qui soit accessible : le passé. A droite en trait pointillé, un avenir conjecturé. Comme les scientifiques ne parviennent pas à dire à quoi correspond cette constante, il est de bon ton de disserter sur le devenir de l'univers dans quelques centaines de milliards d'années. Un futur dont seuls les dieux seront alors les témoins.

Cette constante cosmologique représente une énergie, de nature inconnue. Mais on sait une chose. Pour produire une accélération, celle-ci doit être négative. On chercha alors à lui attacher un équivalent en utilisant la relation d'Einstein :

$$E = mc^2$$

On obtient alors ceci :

Nous avions utilisé la couleur jaune pour la matière ordinaire, la
couleur bleue pour la matière sombre. Nous représenterons le contenu
enéquivalent-matière de l'énergie noire par la couleur verte.

Mais le public a besoin de choses à quoi s'accrocher. Pendant des décennies, si cette matière sobre est faite de particules, on peut penser alors un à une sorte de gaz, dont les éléments s'agiteraient en tous ses avec une vitesse d'agitation thermique. Evidemment, on pense à les doter d'une masse positive. Dans ces conditions leur contribution moyenne à l'énergie serait sous forme d'énergie cinétique :

$$½ \, m \, V^2$$

Quelle est alors l'ordre de grandeur de cette vitesse d'agitation V ? Comme la contribution en « équivalent masse » de cette énergie négative correspond à mc^2,où c est la vitesse de la lumière, on en conclut que pour que cette contribution d'une énergie d'agitation thermique, positive, ne nous crée pas de problème, il suffit que cette vitesse V soit faible devant c. On décide, faut de pouvoir dire quoi que ce soit sur sa nature, de qualifier cette matière sombre de « froide [18]» ?

Le nouveau « modèle standard » prend alors le nom de :

Modèle ΛCDM[19]

[18] Une « matière sombre chaude » étant alors dotée d'une vitesse d'agitation thermique relativiste.

[19] CDM pour « Cold Dark Matter ».

Chapitre 5 :

Et pendant ce temps-là, les théoriciens.

Nous avons brièvement évoqué l'échec de l'extension du bestiaire des particule à travers la supersymétrie. Une particule candidate avait retenu particulièrement l'attention des théoriciens, en l'occurrence le compagnon supersymétrique du neutron, le neutralino. Celui-ci a été considérée comme le meilleur candidat en tant que composant de la matière sombre. Des expériences furent tentées, dans différents pays, pour tenter de la capturer. On supposait que ce neutralino n'interagissait que très faiblement avec la matière ordinaire. Le signal recherché devait donc être extrêmement faible. Il était donc indispensable de se protéger du bruit de fond lié au bombardement de la Terre par les rayons cosmiques. Dans ce but des laboratoires ont été installé dans des tunnels routiers, sous des milliers de mètres de roc, ou au fond de mines. L'expérience en laquelle les scientifiques fondaient le plus d'espoir consistait à enregistrer le signal issu de l'interaction de ce neutralino avec une masse de Xénon liquide. On tenta donc l'expérience avec un kilo de xénon, puis dix, puis cent, puis une tonne. Aujourd'hui il existe des détecteurs comportant 4 et 6 tonnes de xénon. Mais point de résultat.

On est alors confronté, non à un problème scientifique, mais à un problème psycho-sociologique. Comment admettre que cette voie est sans issue, alors qu'on ne s'autorise à n'en imaginer aucune autre ?

La théorie des cordes, nées dans les années soixante, représente un autre exemple de dédale dans lequel se sont perdus des milliers de chercheurs. Il faut se situer à cette époque.. Les théoriciens des particules se rendent bien compte que quelque chose coince dans leur approche. Celle-ci semble plafonner. Dans ces conditions il n'était pas illogique de rechercher une approche totalement différente. La théorie des cordes s'est présentée comme une voie totalement novelles, une approche différente des problèmes. Elle se voulait susceptible d'apporter des solutions à tous les problèmes, en faisant figure de « théorie du tout[20] ». Son défaut majeur était sa difficulté à se brancher sur le réel. On entend par là, expliquer un phénomène ou une observation, prévoir quelque chose, fournir un modèle d'objet, une modélisation d'un processus.

A la base il y avait une extension du contexte dimensionnel, au-delà de quatre, vers dix et même onze dimensions. On est tenté de citer la phrase du philosophe latin Sénèque

[20]En anglais : TOE « Theory of Everything". En fait TON : "Theory of Nothing", Théorie de Rien du tout.

En effet, pour peu qu'on s'aventure dans les arcanes de l'histoire des sciences on constate que derrière les formalismes les plus sophistiqués il y a toujours à la base, des idées, un programme, un plan. Les mathématiques sont là pour aider le théoricien. En physique, elles ne constituent pas une fin en elles-mêmes. Mais elles sont utiles, nécessaires. Le mathématicien Jean-Marie Souriau disait :

- *Les mathématiques sont comme des chaussures. On peut marcher sans chaussures. Mais avec, on va plus loin, et plus vite.*

Pour ceux qui ont un niveau mathématique correspondant à celui de mathématiques spéciales, je terminerai cet ouvrage avec des pages qu'eux seuls pourront lire et apprécier. Mais je décrirai cependant les démarches sans faire recours à cette traduction mathématique, sous une forme qui reste accessible aux non-mathématiciens. Dans ce qui va suivre nous verrons les impasses dans lesquelles se sont engagés des gens qui, justement, ont entrepris de jouer avec des formalismes en perdant complètement de vue les idées directrices.

Il faut toujours garder en tête que ces mathématiques ne sont que des outils. Les idées sous-jacentes, toujours très simples, sont toujours beaucoup plus importantes que les formalismes avec lesquelles on les exprime. Ca n'est en tout cas pas parce que l'écriture mathématiques est compliquée que cela signifie que cette approche est la bonne :

Sous cet angle on peut dire que les cinquante années de buryrocinèse[21] que représente la théorie des cordes sont l'exemple d'un formalisme exempt de véritable idée directrice. L'opération aboutit à une fantastique aberration, à une combinatoire susceptible d'engendrer 10^{500} théories possibles.

En oubliant que 10^{500} fois une absence d'idée donne une absence de résultat.

Quand j'étais écolier nous avions un professeur de dessin qui nous disait :

- *Quand vous faites une esquisse, combinez une multitude de traits. Alors, le bon sera nécessairement dedans.*

Les gens des cordes sont comme des dessinateurs qui ont tracé une telle quantité de traits sur une feuille, qu'elle en prend une teinte noire uniforme, et qui disent : «les plus beaux dessins du monde sont automatiquement sur cette feuille, car elle les contient tous ».

On ne sait pas ce que deviendra cette pseudo théorie. Ses champions continuent d'en parler. On trouve sur Wikipedia des pages où les différentes variantes sont recensées, souvent affublées de noms étranges, comme *ekpyrotiques*(du grec *ekpyros* : « embrasement »). Créer un mot nouveau, de préférence grandiloquent, est en général une manière utilisée par beaucoup pour donner l'illusion d'une avancée.

[21] Du grec butyros, le beurre et kinesis, le mouvement.

Les supercordes pourraient être réutilisées pour faire des super-chaussettes.

On a vu qu'au dix-neuvième siècle étaient apparues les équations permettant d'avoir prise sur les phénomènes de la Nature. Dans ces équations on trouve un certain nombre de quantités, présentées comme des constantes de la physique.

c : la vitesse de la lumière

G : la constate de la gravitation.

m : « les masses des différentes particules ».

e : la charge électrique élémentaire.

ε_o : la constante diélectrique du vide.

μ_o : la perméabilité magnétique du vide.

h : la constante de Planck.

α : la constante de structure fine.

R_b : le rayon de Bohr

etc. .

Toutes ne sont pas indépendantes. Par exemple la vitesse de la lumière, la constante diélectrique et la perméabilité magnétique du vide sont reliées par la relation :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_o \varepsilon_o}}$$

Les scientifiques se sont donc interrogés en se demandant si ces grandeurs méritaient leur dénomination de constantes absolues, invariables. Ils ont donc envisagé que ces constantes puissent avoir varié au fil de l'évolution cosmique. Ils ont donc étudié leurs possibles variations, en les prenant les unes après les autres. Toutes sortes de contradictions sont alors apparues. Dans un cas les atomes ne pouvaient plus se former, etc. On a ensuite envisagé de coupler des variations de différentes constantes. Mais des contradictions ont subsisté.

A part cela, des dizaines d'années ont passé sans que l'on puisse constater le moindre progrès dans la recherche de la nature de la matière sombre et de l'énergie noire. Mais alors, que s'était-il passé pour que nos disciplines théoriques se retrouvent dans une telle impasse ?

N'étant pas spécialiste de mécanique quantique, je me contenterai de cette remarque sur la nature des opérateurs d'inversion d'espace et de temps.

La Bible de la Théorie Quantiques des Champs

Dans le livre cela se situe dans la section intitulée : 2.6 **Inversions d'espace et de temps.**

Et plus précisément au pas de la page 75 et dans la page 76. L'opérateur d'inversion d'espace est dénommé P (P pour P-symétrie, , « parité ») . C'est la symétrie miroir. La lettre

T désigne l'opérateur d'inversion de temps. Weinberg précise que ces deux opérateurs peuvent être :

- Linéaire et unitaire

ou :

- Anti linéaire et antiunitaire.

Afin d'éviter l'émergence d'états d'énergie négative, considérés a priori comme impossible il indique qu'on est obligé[22] d'opter pour les choix :

- P Linéaire et unitaire
- T Anti linéaire et antiunitaire.

A cela on objectera ce qui découle du constat de l'accélération de l'expansion cosmique. Celle-ci est due à une énergie (noire) négative, a priori somme d'états d'énergie négative.

Je reviendrai plus tard sur les raisons qui m'incitent à penser que l'adjonction des masses négatives est la clé de la quantification de la gravitation.

Fin de cette courte digression dans un terrain qui n'est pas le mien.

Je reviens donc vers la cosmologie et l'astrophysique théorique.

---

[22] « There are no states of negative energy energy less that that of the vacuum) so we are forced to choose …" : "ainsi sommes-nous obligés de choisir … ' … et un peu plus loin : " … disastrous conclusion".

Comme je l'ai dit plus haut, en 1915 Albert Einstein publie l'équation de champ qui constitue la base du modèle de la relativité générale. Et, peu de mois après le mathématicien Karl Schwarzschild publie deux articles coup sur coup, décrivant la géométrie à l'extérieur et à l'intérieur d'une sphère emplie d'un matériau incompressible. Hélas, peu de temps après, il décède d'une infection contractée sur le front russe, qu'il a rejoint comme volontaire.

Je vais essayer de présenter de quoi il retourne sans utiliser d'outils mathématiques qui auraient pour effet de l'arguer beaucoup de lecteurs de ce livre. Il n'est en effet pas indispensable de comprendre tus les tenants et aboutissants de ces solutions de l'équation d'Einstein pour percevoir ce qui s'est passé à cette époque et pendant les années qui ont suivi, jusqu'au déclenchement de la seconde guerre mondiale.

Ces solutions s'expriment sous la forme d'expressions algébriques qu'on appelle des métriques. Voici celle qui, dans les écrits de Schwarzschild, décrit la géométrie à l'extérieur de la boule fluide :

Außerhalb der Kugel bleibt die Form des Linienelements dieselbe, wie beim Massenpunkt:

$$\left.\begin{aligned} ds^2 &= \left(1-\frac{\alpha}{R}\right)dt^2 - \frac{dR^2}{1-\alpha/R} - R^2\left(d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta\, d\phi^2\right) \\ \text{wobei: } \quad R^3 &= r^3 + \rho \end{aligned}\right\} \quad (36)$$

ist. Nur wird ρ nach (33) bestimmt, während für den Massenpunkt $\rho = \alpha^3$ war.

§ 7. An die im vorigen Paragraphen enthaltene vollständige Lösung unseres Problems knüpfen sich folgende Bemerkungen.

La solution géométrique de Schwarzchild décrivant l'extérieur de la boule

C'est une fonction où on distingue des variable et un paramètre, représenté par la lettre ⍰. C'est une grandeur positive, une longueur à laquelle on donnera plus tard le nom de « rayon de Schwarzschild ».

On a quatre variables, ce qui est normal puisque cette expression se réfère à un espace à quatre dimensions. La première est désignée par la lettre *t* et c'est la coordonnée de temps. On a ensuite deux angles[23] :

ϑ et ϕ

La dernière variable est désignée par la lettre *R*, et va être la source d'une erreur sur laquelle s'appuieront des centaines de thèses de doctorat et des milliers d'articles !

[23] Le lycéen reconnaitra l'indice d'une représentation de cet « objet » en *coordonnées polaires*.

Avant de nous concentrer sur cette lettre r commençons par nous débarrasser d'une lettre grecque □ , dont lire qu'elle est tout simplement égale à □. Aussi, simplifions. Il vient :

$$ds^2 = \left(1 - \frac{\alpha}{R}\right) dt^2 - \frac{dR^2}{1 - \alpha/R} - R^2 (d\vartheta^2 + \sin^2 \vartheta \, d\phi^2)$$

$$R^3 = r^3 + \alpha^3$$

Qu'est-ce que cette lettre r minuscule ? Son sens nous est d'emblée donné par Schwarzschild. Au départ il imagine exprimer sa solution à l'aide d'une coordonnée de temps t , et des trois coordonnées d'espace tridimensionnel « cartésiennes » :

x , y , z

Mais, tout de suite, il pose :

Schwarzschild: Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes 191

$$ds^2 = F dt^2 - G(dx^2 + dy^2 + dz^2) - H(x\,dx + y\,dy + z\,dz)^2$$

wobei F, G, H Funktionen von $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

Die Forderung (4) verlangt: ... $G = 1$, $H = 0$.

Wenn man zu Polarkoordinaten gemäss $x = r \sin\vartheta \cos\phi$, $y = r \sin\vartheta \sin\phi$, $z = r \cos\vartheta$ übergeht, lautet dasselbe Linienelement:

Ainsi, la valeur minimale de r est zéro. Dans ces conditions la valeur minimale de r est :

R = □

De toute évidence, la « variable radiale », c'est r et non *R*. Dans son papier, Schwarzschild la qualifie de «Hilfsgrö□e » c'est-à-dire de « grandeur intermédiaire ».

→ Et là, quelqu'un va faire l'erreur de confondre r et *r*, de traiter r comme une variable radiale, alors qu'elle ne peut être inférieure à □ , c'est-à-dire au rayon de Schwarzschild , que nous appellerons R_g.

Nous identifierons plus loin l'auteur de cette erreur (de retranscription). A cela s'ajoutera l'inversion des signes dans l'expression, et nous chercherons également qui est à l'origine de ce choix. Toujours est-il qu'un siècle plus tard, en 2015, l'académicien Thibault Damour « monsieur cosmologie en France » donne une conférence à l'occasion du centenaire de la création de la relativité générale.

Thibauld Damour, académicien

Cela se passe dans le grand amphi de l'Institut des Hautes Études de Bures sur Yvette, près de Paris. N'importe qui peut avoir accès à ce document en composant sur Internet l'adresse ci-après :

https://youtu.be/SqGlFifHBfo

A 23 minutes et 6 secondes Il projette l'image-ci-après :

A droite la photographie de Karl Schwarzschild. Juste en dessous sa fameuse solution. Agrandissons :

Karl Schwarzschild

wobei die Hilfsgröße

$$R = (3x_1 + \rho)^{\frac{1}{3}} = (r^3 + \alpha^3)^{\frac{1}{3}}$$

eingeführt ist.

Setzt man diese Werte der Funktionen f im Ausdruck (9) des Linienelements ein und kehrt zugleich zu gewöhnlichen Polarkoordinaten zurück, so ergibt sich das Linienelement, welches die strenge Lösung des EINSTEINschen Problems bildet:

$$ds^2 = (1 - \alpha/R)\,dt^2 - \frac{dR^2}{1-\alpha/R} - R^2(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2)\,,\quad R = (r^3 + \alpha^3)^{\frac{1}{3}} \qquad (14)$$

Dasselbe enthält die eine Konstante α, welche von der Größe der im Nullpunkt befindlichen Masse abhängt.

On reconnait tout de suite, en bas, l'expression présentée plus haut, telle qu'elle émerge de l'article original en allemand. Juste au-dessus, la définition de cette « grandeur intermédiaire r » , d'où émerge instantanément la contrainte :

$$R \geqslant \alpha$$

L'image suivante, montrée par Thibault Damour, à 25 minutes et 2 secondes :

L'histoire accidentée des trous noirs

25'02''

25:04 / 1:16:52

Agrandissons la partie droite de l'image :

L'histoire accidentée des trous noirs

embre 1915 : solution exacte trouvée par **Karl Schwarzschild** (= bouclier noir !

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{R_g}{r}\right)c^2dt^2 + \frac{dr^2}{1 - R_g/r} + r^2\left(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2\right)$$

ayon gravitationnel » : $R_g = \frac{2GM}{c^2}$

Soleil $R_g^{\odot} \simeq 3$ km ; Terre $R_g^{\oplus} \simeq 1$ cm

ondenser la masse du Soleil dans: $R_g^{\odot} \simeq 3$ km $\rightarrow$ densité $\simeq 2 \times 10^{16}$g/cm

Ceci représente l'interprétation « moderne » de la solution de Schwarzschild, décrivant la géométrie à l'extérieur de la masse. La lettre ⍰ été remplacée par le rayon de Schwarzschild.

Mais la lettre *r* s'est substitué à la lettre *R* et la contrainte a purement et simplement disparu!

Accessoirement les signes ont été inversés. Nous reviendrons plus loin sur l'origine de ce changement de signes.

La conséquence est que dès lors nos modernes théoriciens envisageront pendant un demi-siècle d'étudier la structure de cet « objet géométrique » quand *r* est inférieur à ⍰, inférieur au rayon de Schwarzschild R_g, c'est-à-dire « « à l'intérieur de cette sphère » … qui n'existe pas !

Comment se fait-il que le conférencier ne réalise pas une seule seconde la contradiction qui découle de l'affichage de ces deux images ?

Je pense que la réponse est à rechercher dans l'état d'esprit des théoriciens modernes et dans l'idée de progrès scientifique. Depuis 50 ans ceux-ci construisent leurs discours sur les discours de leurs prédécesseurs, en ayant totalement perdu tout esprit critique, tout recul. Si vous leur posiez la question :

- Mais, pourquoi avez-vous remplacé cette lettre *R*, simple *grandeur intermédiaire*, telle que l'avait définie Karl Schwarzschild en 1916, par la lettre *r*, que vous traitez

dès lors comme une *variable radiale*, susceptible de prendre toutes les valeurs positives, jusqu'à zéro ?

Vous obtiendriez peut-être la réponse suivante :

- Quand r devient inférieur au rayon de Schwarzschild, nous sommes *à l'intérieur* de la sphère de Schwarzschild R_g. A ce moment-là cette variable r ne désigne plus le rayon, mais le temps, tandis que t devient une variable d'espace. Ces deux variables échangent leurs rôles respects. On a mis beaucoup de temps à comprendre cela. Ca a été violent[24] (…).

A titre de commentaire, je pense que cette phrase du mathématicien français Jean-Marie Souriau dont j'ai recueilli l'enseignement pendant plus de vingt ans me semble appropriée :

A ce stade il convient de rechercher la source de cette dérive.

J'ai dit plus haut que Hilbert avait publié, le 20 novembre 1915 un article ayant pour titres « les fondements de la physique ». Il découvre alors le premier article publié par Schwarzschild, en janvier 1916, qui décrit la géométrie à l'extérieur d'une masse mais son

[24] C'est le qualificatif employé par Damour.

attention s'arrête là. Il ne prête pas attention au second, celui de février, qui décrit la géométrie à l'intérieur d'une boule emplie d'une matière de densité constante. Il décide d'intégrer ce premier résultat dans une seconde version qu'il publie le 23 décembre 1916, juste avant Noël. On pourra télécharger ces deux documents dans leur traduction française, grâce aux adresses :

http://www.jp-petit.org/papers/cosmo/1915-Hilbert-fr.pdf

http://www.jp-petit.org/papers/cosmo/1916-Hilbert-fr.pdf

Le fait de ne prendre en charge d'une seule de ces solutions géométriques constitue la première erreur. En effet ces solutions n'ont aucun sens, si on les considère isolément.

Nous avions dit plus haut que l'émergence d'une nouvelle physique se présentait comme une complète critique du sens commun. C'est totalement vrai en mécanique quantique, qui abonde en paradoxes. Je les décris dans des vidéos Janus.

Le paradoxe des fentes de Young dans **Janus 5** : https://youtu.be/aLPpCQRfwRg

Le paradoxe d'Einstein-Podowlski-Rosen dans **Janus 6** : https://youtu.be/0Uw0LifxA_A

Cette mécanique quantique avait son leader, le Danois Niels Bohr. Bien qu'Einstein ait toujours été très au fait des avancées de cette nouvelle façon d'avoir prise sur le réel, il restait réticent vis-à-vis de l'aspect probabilité qui sous-tend l'ensemble de l'édifice. On connaît l'échange entre Einstein et Bohr :

Einstein :

- *Je refuse de croire que Dieu joue aux dés !*

Ce à quoi Bohr avait répondu :

- *Mais qui êtes-vous, pour dire à Dieu ce qu'il doit faire !*

Niels Bohr et Albert Einstein vers 1930

Jusqu'à sa mort Einstein chercha à prendre cette mécanique quantique en défaut. Il crut trouver la faille avec le paradoxe EPR, voir la vidéo **Janus 6**. Dans cette expérience un atome émet deux photons, dans des directions diamétralement opposées. On agit alors sur l'un deux en faisant tourner « son plan de polarisation[25] ». Mais l'autre photon en est immédiatement « averti » et tourne également son propre plan de polarisation en conséquence[26]. Le sens commun nous suggèrerait que ces deux photons parviennent à communiquer et que cette information cheminerait alors à deux fois la vitesse de la lumière.

Les calculs de la mécanique quantique prédisaient qu'il en serait ainsi. Hélas à la fois Bohr et Einstein étaient décédés quand le Français Alain Aspect apporta la confirmation expérimentale au début des années quatre-vingt[27].

Ainsi, l'absurde, ce qui violait le sens commun apparaissait plus proche de la réalité physique.

Est-ce à dire que ce sens commun ne peut plus nous être utile ?

Il faut jouer sur les deux tableaux.

- A la fois être prêt à admettre que des élucubrations mathématiques peuvent suggérer des aspects du réel qui s'opposent complètement à ce sens commun. Jusqu'à ce que, bien entendu, la Nature s'exprime en confirmant les prédictions de ce modèle (ce qui n'a pas été le cas)

[25] Grâce à l'effet découvert par l'Anglais Faraday, voir la vidéo Janus 6.
[26] De manière à ce que les deux plans restent orthogonaux, comme le prévoit la mécanique quantique.
[27] Ce qui lui valut le prix Nobel en 2022, soit … quarante ans plus tard.

- Mais également être toujours prêt à reconsidérer certains de ces élucubrations mathématiques sous le système optique de ce sens commun, quand elles tardent trop à produire une confirmation avec l'expérience et l'observation.

S'agissant de la relativité générale nous allons voir que cette seconde attitude prévaut. L'approche des problèmes en utilisant des images et l'analogie, permet de se rapprocher des réalités, c'est-à-dire en cosmologie, des observations. L'intuition reste un outil utile.

Qu'est-ce que modéliser des aspects du cosmos à l'aide de la relativité générale ? Concentrons-nous sur des solutions stationnaires, indépendantes du temps.

Celles-ci reposent entièrement sur l'équation d'Einstein. Son second membre prend en compte le contenu de l'univers, en tout point.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R \, g_{\mu\nu} = \chi T_{\mu\nu}$$

S'il est non nul, alors la solution géométrique qui émergera de cette équation décrira l'intérieur d'une masse.

S'il est nul , l'équation devient :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R \, g_{\mu\nu} = 0$$

La solution qui émergera de cette équation se réfèrera à une portion de l'univers totalement vide.

En 1916, avec cette suite de deux articles, Schwarzschild construit dans le premier (janvier) la géométrie à l'extérieur de la masse, et dans le second (février) la géométrie à l'intérieur de la masse.

En 1916 un jeune mathématicien (il a trente ans) apporte sa propre lecture du travail de Schwarzschild. Il s'appelle Ludwig Flamm. Son travail, et même son nom, restent totalement inconnus des spécialistes de cosmologie, pour une raison simple : son article n'a été traduit en anglais qu'en 2012 !

Il est difficile de s'en procurer la copie, non seulement en anglais, mais même sous sa forme originale, en langue allemande, sinon en payant. Pour cette raison nous l'avons traduit en français et vous pourrez le télécharger à cette adresse :

http://www.jp-petit.org/papers/cosmo/1916-Flamm-fr.pdf

Comme on se limite à des solutions indépendantes du temps (invariantes par translation temporelle) on est ramené à la compréhension d'une hypersurface à trois dimensions (à t constant). Flamm aborde la question en faisant des coupes de celle-ci, et c'est remarquable.

Nous allons généraliser ce concept de coupe (en assignant à l'une des coordonnées une valeur constante). Considérons un plan « plongé » dans un espace à trois dimensions. Ce plan est une surface 2D dénuée de courbure. Si nous opérons une coupe de ce plan à z = constante, nous obtiendrons un objet à une dimension (2 – 1), une droite, un objet « euclidien ».

Couple plane d'un plan

Par contre si nous effectuons cette coupe à z = constante d'un objet 2D doté de courbure, par exemple une sphère, le résultat est toujours un objet à une dimension, mais ça n'est plus une droite.

Coupe plane d'une sphère S2

Effectuer une « coupe par un plan » réduit le nombre de dimensions d'un objet d'une unité. Si nous envisageons d'effectuer des section d'une hypersurface à trois dimensions, cette section sera un objet à deux dimensions. Si cette hypersurface possède une courbure, alors cette section diffèrera d'un plan.

Imaginons une hypersurface à trois dimensions, à courbure constante. C'est une « hypersphère », dont on ne peut évidemment pas associer à une image mentale[28]. Si nous effectuons des « coupes » par des « plans » r = Constante, ces coupes seront des sphères S2[29].

La coupe d'une sphère S3 par un plan.

Ci-après la traduction de l'expression des solutions intérieure et extérieure de Schwarzschild telle que Flamm les présente, en 1916 :

Flamm 1916

2

$$ds^2 = \left(\frac{3\cos\chi_a - \cos\chi}{2}\right)^2 dt^2 - \frac{3}{\kappa\rho_0}\left(d\chi^2 + \sin^2\chi\, d\vartheta^2 + \sin^2\chi\,\sin^2\vartheta\, d\varphi^2\right)$$

où les coordonnées ont déjà été choisies d'une manière particulière et appropriée. Voici une coordonnée qui augmente radialement à partir du centre de la boule de fluide, atteignant la valeur χ_a à la surface limite, et ϑ et φ sont les coordonnées sphériques habituelles. La constante ρ_o représente la densité de la boule de fluide et κ représente la constante gravitationnelle de la théorie d'Einstein, qui a pour valeur

$$\kappa = \frac{8\pi k^2}{c^2},$$

Où κ est la constante gravitationnelle habituelle

$$k^2 = 6.68 \cdot 10^{-8}\mathrm{cm}^3\mathrm{g}^{-1}\mathrm{sec}^{-2}$$

Et c la vitesse de la lumière.

[28] Sa métrique serait $ds^2 = dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2)$

[29] Dans l'expression de la métrique il suffit de faire dr = 0 et on tombe sur la métrique d'une sphère de rayon r.

Ludwig Flamm 1916 :

§2 . Nous pouvons maintenant, de manière analogue, examiner le premier cas traité par Schwarzschild, le champ gravitationnel d'une masse ponctuelle. L'élément de ligne, dans sa forme la plus simple, a la même structure que ci-dessus et se lit comme suit

$$d s^2 = \left(1 - \frac{\alpha}{R}\right) d t^2 - \frac{d R^2}{1 - \frac{\alpha}{R}} - R^2 \left(d \vartheta^2 + \sin^2 \vartheta \, d \varphi^2\right)$$

Une quantité est entièrement nouvelle dans cette expression, la constante α[1], qui a la valeur suivante

$$\alpha = \frac{2k^2 M_0}{c^2},$$

où *Mo* représente la masse centrale, telle qu'elle serait obtenue à partir de mesures astronomiques. L'élément de ligne sera à nouveau décomposé selon la formule (1).

On verra plus loin comment exprimer les deux solutions avec le même jeu de coordonnées.

Le terme k^2 est simplement la façon dont on représentait à cette époque la constante de la gravitation G.

La description de la géométrie donnée par Schwarzschild passe par le raccord entre deux hypersurfaces, le long d'une sphère (en l'occurrence la surface de cette sphère emplie d'un matériau incompressible de densité constante). La première hypersurface est une hypersphère à trois dimensions, définie par la solution intérieure de Schwarzschild [30] de courbure constante. Sa section plane par un plan □ = constante est donc une sphère S2.

La seconde est définie par la solution métrique extérieure de Schwarzschild [31]. Comme ces géométries sont indépendantes du temps, on peut donc commencer par considérer des sections à t constant. On obtient alors une hypersurface à trois dimensions :

r ,□ , □

Flamm va alors considérer une section à □ □constant. Il obtiendra alors un objet géométrique à deux dimensions :

r ,□

Tout à l'heure, quand nous avions effectué une coupe de notre hypersphère à trois dimensions la section obtenue (un cercle) avait hérité d'une partie de la symétrie de l'objet 3D. L'hypersurface 3D de Schwarzschild possède la symétrie sphérique. La section que nous réalisons hérite d'une partie de cette symétrie au sens où cette surface 2D possède une symétrie de révolution.

[30] Son second papier, de février 1916
[31] Le premier papier, de janvier 1916

Flamm se dit « opérons de nouveau une section de cette surface 2D par des plans à ⍰ constant ». Et il obtient alors un objet à une dimension, une courbe qui est une « parabole couchée » :

Parabole couchée

Ca n'est rien d'autre que la méridienne de cette surface de révolution qui représente la section par un plan de l'hypersurface solution extérieure, donnée par Schwarzschild dont l'équation est (allez vérifier dans l'article) :

Flam 1916

$$\cos^2 \chi = 1 - \frac{\alpha}{R}$$

En désignant par z la coordonnée selon la direction de l'axe de rotation, l'équation de la courbe méridienne suit alors :

$$\frac{dz}{dR} = \operatorname{tg} \chi = \sqrt{\frac{\alpha}{R - \alpha}}$$

ou :

$$z^2 = 4\alpha(R - \alpha).$$

Ceci correspond à une parabole

Dans Wikipedia la « surface de Flamm »

Cette surface [32] présente un « cercle de gorge », de périmètre minimal 2 ▯R_s, ou R_s est le rayon de Schwarzschild. Elle relie deux plans. En effet la courbure de la surface tend vers zéro à l'infini [33] .

En considérant maintenant que cet objet correspond à une coupe à ▯ constant de l'hypersurface correspondant à la solution extérieure de Schwarzschild, et bien que cela soit quelque peu difficile à se le représenter pour le commun des mortels, le cercle de gorge de cette surface de Flamm, décliné pour toutes les valeurs de ▯, enveloppera une sphère.

d'aire 4▯ R_s^2

Laquelle constitue la sphère de gorge de l'hypersurface qui relie entre eux deux espaces 3D euclidiens.

Ce qui est important, crucial de comprendre est que, de même que la parabole couchée « n'existe pas » pour les valeurs :

$0 < r < Rs$

Tout simplement parce que la valeur de z issue de l'équation de la méridienne, voir plus haut, n'est plus réelle.

---

[32] C'est un résultat que nous avions retrouvé en 2015. Voir : http://www.jp-petit.org/papers/cosmo/2015-ModPhysLettB.pdf

[33] La surface de Flamm a une courbure négative. Ses géodésiques évoqueraient donc une répulsion. Mais les géodésiques solutions de l'équation d'Einstein sont des géodésiques 4D. Les masses ne suivent pas les géodésiques 2D de la surface de Flamm.

De même la surface de Flamm « n'existe pas » pour les mêmes valeurs, correspond à l'intérieur d'un cylindre de périmètre 2 ⍰R_s

De même l'hypersurface de la solution extérieur de Schwarzschild « n'existe pas » à l'intérieur d'une sphère d'aire 4⍰ R_s^2

Vous remarquerez qu'à dessein je n'ai pas utilisé le mot « centre » et « rayon ». Car ce point n'appartient pas à cet objet géométrique.

Nous avons dit plus haut que l'hypersurface 3D correspondant à la solution extérieure trouvée par Schwarzschild avait la topologie d'une sphère S3. Celle-ci pourra être feuilletée par une suite de coupes à ⍰ constant. Ces coupes seront des objets de révolution, en l'occurrence des sphère. Comme pour l'objet précédent, Flamm opère une nouvelle section par des plans à ⍰ constant et il obtient un arc de cercle. En adaptant cette seconde méridienne, il obtient donc la méridienne complète de la section à ⍰ constant de l'hypersurface solution.

Flamm 1916

Fig. 3

Tout ceci traduit, en 1916, chez ce garçon de 30 ans, une maîtrise parfaite de la géométrie de ces objets géométriques que sont les hypersurfaces riemanniennes à trois dimensions, qui fait totalement défaut aux théoriciens d'aujourd'hui.

Pour que le lecteur s'y retrouve nous allons commencer par transformer la solution intérieure de Schwarzschild de manière à l'exprimer avec les mêmes variables que la solution extérieure.

Le changement de variable, nous l'avons vu plus haut. Réécrivons la solution intérieure en faisant apparaître la constante de la gravitation et en faisant réapparaître la vitesse de la lumière, prise égale à l'unité dans l'article de Flamm, comme dans ceux de Schwarzschild.

$$d s^2 = \left(\frac{3 \cos \chi_a - \cos \chi}{2}\right)^2 c^2 d t^2 - \frac{3 c^2}{8\pi G\rho_0} \left(d \chi^2 + \sin^2 \chi \, d \vartheta^2 + \sin^2 \chi \, \sin^2 \vartheta \, d \varphi^2\right)$$

$$\hat{R}^2 = \frac{3 c^2}{8\pi G\rho_0}$$

Tous calculs faits, il vient [34] :

$$d s^2 = \left[\frac{3}{2} \sqrt{1 - \frac{R_a^2}{\hat{R}^2}} - \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{R^2}{\hat{R}^2}} \right]^2 c^2 d t^2 - \frac{dR^2}{1 - \frac{R^2}{\hat{R}^2}} - R^2 \left(d \vartheta^2 + \sin^2 \vartheta \, d \varphi^2\right)$$

La solution du problème traité par Schwarzschild consiste à joindre deux portions de solution, deux parties d'hypersurfaces.

Pour la solution intérieure on ne retiendra que la portion correspondant à r $< R_a$ (correspondant à l'intérieur de l'étoile).

On complètera avec la solution extérieure, prise quand $R > R_a$(extérieure à l'étoile).

La méridienne correspondra à une partie de la méridienne de la surface de Flamm, raccordée à un arc de cercle :

[34] Expression qu'on retrouvera dans la chapitre 5 de l'ouvrage d'Adler, Schffer et Bazin « Introduction to General Reltivity », Mc Graw Hilled. Téléchargeable à http://www.jp-petit.org/books/asb.pdf

Flamm 1916

Fig. 3

La méridienne de l’hypersurface-solution

Dans la solutions géométrique extérieure nous avons vu apparaître une contrainte, celle de ne la considérer que pour les valeurs *R*>□ , élément dont la valeur est indiquée dans un encadré, plus haut, sinon l’élément de longueur *ds* n’est plus réel, on est alors en dehors de l’hypersurface.

On sait que pour le Soleil cette longueur est de 3 kilomètres.

Mais on voit apparaître une seconde contrainte pour la solution intérieure. Si

On a un dénominateur qui devient nul. Donc nous n’utiliserons la partie de la solution que si :

$$R < \hat{R} = \sqrt{\frac{3\,c^2}{8\pi G \rho_0}}$$

Appliquons cela au Soleil. Que vaut cette longueur ? Réponse : 580 fois le rayon de l’astre.

Mais quelle est la signification géométrique de cette longueur ? On le vérifie aisément. C’est tout simplement e rayon du cercle sur lequel on va prélever un arc pour compléter la méridienne.

Flamm 1916

Fig. 3

Le lecteur peu familier avec l’algèbre se sentira peut-être un peu perdu. Oublions toutes ces affreuses formules et concentrons-nous sur les dessins, sur la géométrie.

Au passage on va retourner les figures, la notion de courbure étant plus familière quand on parle de bosses et non de creux. L’image qui va suivre n’est pas une image didactique. Elle correspond réellement à la solution. C’est la coupe 2D de l’hypersurface solution 3D.

Comment celle-ci est-elle fabriquée ?

Vous prenez la moitié d’une surface de Flamm (obtenue en faisant tourner une parabole autour d’une axe). Vous plaquez ensuite une sphère, comme ceci :

Ces deux objets sont en contact le long d'un cercle et le long de celui-ci les deux surfaces on leur plan tangent commun.

Vous soudez le long de ce cercle.

Puis vous enlevez portion de la surface de Flamm dont vous n'avez plus besoin :

Vous enlevez la portion de sphère qui est en trop :

Et vous obtenez votre résultat, en combinant deux portions de surfaces qui représentent des portions de solutions géométriques.

Maintenant, quelle signification peut avoir ces deux solutions mathématiques, prises isolément ?

Aucune ….

Prises séparément ces deux être géométriques ne décrivent pas l'intégralité de la géométrie dans la région considérée. Imaginons une portion d'espace de courbure constante, qui représente un astre de densité constante. Comment est la géométrie à l'extérieur. Il manque à cet objet son complément, la géométrie qu'il crée dans le vide qui l'entoure.

Il en est de même pour cette géométrie associée à cette surface de Flamm. Le long de cette hypersurface on trouvera bien les trajectoires quasi-Képlériennes (qui ne sont pas des géodésiques de la surface de Flamm !). Mais alors, où est la masse qui crée cette courbure de l'espace ?

S'agissant d'un objet comme le Soleil, les courbures sont faibles. Ce qui est l'équivalent du passage reliant les deux nappes de la surface de Flamm, lui-ci est bien minuscule, se situant au centre de l'astre. Quant à la portion de sphère figurant l'intérieur du Soleil, ce bouclier est presque plat.

On peut cependant essayer de voir ce qui peut se passer quand, en maintenant la masse volumique constante on accroit le rayon de l'astre.

Vous savez que se forme, au cœur des étoiles massiques, un reliquat sous la forme d'une sphère de fer. Quand l'étoile massive évolue en supernova elle s'effondre sur ce cœur de fer et, en ce comprimant, le transforme en étoile à neutrons, comme conjecturé par Fritz Zwicky dans les années trente.

Les étoiles tournent sur elles-mêmes. Quand une patineuse sur glace ramène ses bras le long de son corps, sa vitesse de rotation s'accroit. De même, à l'issu de de ce processus les étoiles à neutrons tournent comme des toupies. Couramment jusqu'à 1000 tours par seconde. Les neutrons sont alors serrés les uns contre les autres.

Au passage, qu'est-ce qui entraîne la disparition des protons et des électrons ?

Dans la nature le neutron isolé est instable. Il se décompose spontanément au bout de 15 minutes en proton et électron[35].

Dans l'univers les particules, pour « exister » doivent pouvoir caser leur « fonction d'onde ». Car les particules sont aussi des ondes. L'ordre de grandeur de la longueur d'onde associée est donnée par la longueur de Compton :

$$\lambda_c = \frac{h}{mc}$$

On voit tout de suite qu'elle varie comme l'inverse de la masse. Ainsi, plus les particules ont légères, plus elles occupent de place dans l'espace. On a tendance dans les dessins censés représenter les composants des atomes, à dessiner des gros protons et neutrons et de minuscules électrons. En fait l'électron est 1850 fois (l'inverse du rapport des masses) que le proton. Un concept que j'avais illustré dans ma bande dessinée Big Bang :

[35] Plus un antineutrino.

Donc, pour exister, il faut de la place. Les électrons ayant besoin de 1850 fois plus de place que les neutrons, ils seront les premiers à disparaître, entraînant avec eux la conversion des protons en neutrons.

Quand le processus de formation d'une étoile à neutrons est achevé, ceux-ci sont pratiquement au contact et on peut assimiler ce milieu à de fragiles ampoules électrons, serrées les uns contre les autres. On comprendra intuitivement que cette résistance à la pression n'est pas infinie. Mais, pour le moment, contentons-nous d'envisager l'accroissement très progressif de la masse d'une étoile à neutrons, captant les légères effluves d'hydrogène et d'hélium envoyées par une étoile compagne.

Etoile à neutrons captant la matière émise par une étoile compagne.

Cette situation doit être très fréquentes dans les galaxies où, tout d'abord, la moitié des étoiles forment des systèmes doubles. Dans beaucoup de ce systèmes les étoiles de ces systèmes doubles sont constituées d'étoiles massives et sont proches l'une de l'autre.

Le Soleil émet un « vent solaire ». Il en est de même pour les étoiles massives, qui peuvent ainsi émettre une quantité de matière équivalant à plusieurs masses solaires. Ainsi, ce schéma où l'une des deux étoiles massives s'est déjà transformée en étoile à neutrons et capte de la matière émise par sa compagne, avant que celle-ci ne se transforme elle aussi en étoile à neutrons est-il parfaitement réaliste. Ce flux reste très modeste et il faudra des centaines de millions d'années pour que le gain en masse puisse amener l'étoile à neutrons dans un état de criticité que nous allons maintenant envisager, sous son angle géométrique.

Trois des dessins précédents évoquaient la structure géométrique d'une étoile à neutrons. Toutes ces étoiles ont un paramètre en commun : leur densité ρ_0 qu'on peut assimiler à une constante. Ainsi le modèle de Schwarzschild est-il pertinent. La structure géométrique de l'objet résulte donc de la conjugaison d'une portion de surface de Flamm et d'une sphère de rayon constant, puisque sa valeur ne découle que de la valeur de ρ_0.

$$\hat{R} = \sqrt{\frac{3\,c^2}{8\pi G\rho_0}}$$

Ce qui évoluera en fonction du rayon de l'étoile, c'est la surface de Flamm, dont le cercle de gorge a pour périmètre $2\pi R_s$ où R_s est le rayon de Schwarzchild, qui croît comme la masse, donc comme le cube du rayon de l'étoile.

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} = \frac{2G}{c^2}\,\frac{4}{3}\,\pi R^3 \rho_0 = \frac{8\pi G \rho_0}{3\,c^2} R^3 = \frac{R^3}{\widehat{R}^2}$$

Le dessin ci-après illustre ce qui va se passer. Au fur et à mesure que le rayon de l'étoile croît le rayon de la Schwarzschild, qui s'en déduit, va rattraper le rayon « r chapeau ».

Le rayon de Schwarzschild croît plus vitesse que celui de l'étoile.

Ci-après l'évolution de l'ensemble des deux surfaces :

Vers une criticité géométrique.

On débouche sur une situation-limite :

Au-delà, le raccord entre les deux surfaces n'est plus possible. La masse de l'étoile à neutrons correspondante correspond à une masse volumique dans une sphère de rayon r chapeau, ce qui correspond à 3 masses solaires.

Mais, dans ce scénario d'une montée vers la criticité il y a un point qui a totalement échappé aux cosmologistes. Mais Schwarzschild, en fin physicien, l'a aussitôt noté dans son article de 1916.

Il est alors le premier à avoir envisagé (en 1916 !)une possible variation de la vitesse de la lumière. Voici le passage en question, d'abord en allemand :

4. Die Lichtgeschwindigkeit in unserer Kugel wird:

$$v = \frac{2}{3\cos\chi_a - \cos\chi}, \qquad (44)$$

sie wächst also vom Betrag $\frac{1}{\cos\chi_a}$ an der Oberfläche bis zum Betrag $\frac{2}{3\cos\chi_a - 1}$ im Mittelpunkt. Die Druckgröße $\rho_0 + p$ wächst nach (10) und (30) proportional der Lichtgeschwindigkeit.

Im Kugelmittelpunkt ($\chi = 0$) werden Lichtgeschwindigkeit und Druck unendlich, sobald $\cos\chi_a = 1/3$, die Fallgeschwindigkeit gleich $\sqrt{8/9}$ der (natürlich gemessenen) Lichtgeschwindigkeit geworden ist. Es

Dont voici la traduction en français :

4. **La vitesse de la lumière dans notre sphère est:**

$$v = \frac{2}{3\cos(\chi_a) - \cos(\chi)} \qquad (44)$$

de sorte qu'elle varie à partir de la valeur sur la surface

$$\frac{1}{\cos(\chi_a)}$$

jusqu'à la valeur au centre

$$\frac{2}{3\cos(\chi_a) - 1}$$

La variable de pression $\rho_0 + p$ augmente selon (10) et (30) proportionnellement à la vitesse de la lumière.

Au centre de la sphère ($\chi = 0$)**, la vitesse de la lumière et la pression deviennent infinies (...)** dès que $\cos(\chi_a) = \frac{1}{3}$, la vitesse de chute est devenue égale à $\sqrt{\frac{8}{9}}$ de la vitesse de la lumière (mesurée naturellement).

Dans son article Schwarzschild donne la valeur 1 à la vitesse de la lumière dans le vide. En effectuant le changement de variable pour passer de sa coordonnée à la coordonnée ▯à la coordonnée r on obtient :

$$v = \frac{c}{\frac{3}{2}\sqrt{1-\frac{R_a^2}{\hat{R}^2}} - \frac{1}{2}\sqrt{1-\frac{R^2}{\hat{R}^2}}}$$

Au centre de l'étoile cette vitesse est :

$$v_o = \frac{c}{\frac{3}{2}\sqrt{1-\frac{R_a^2}{\hat{R}^2}} - \frac{1}{2}}$$

Le dénominateur de cette fraction s'annule pour

$$\boxed{R_a = \sqrt{\frac{8}{9}}\,\hat{R}}$$

Ce qui signifie que quand le rayon de l'étoile à neutrons atteint cette valeur, la vitesse de la lumière devient infinie en son centre. On obtient alors une seconde valeur de sa masse critique, plus faible :

→ Mc = 2.5 masses solaires

Cette valeur correspond à une valeur angulaire critique :

⍰$_{ac}$ = arc cos (1/3)

Soit **70,55°**

Toujours dans son papier de février 1916 Karl Schawrzchild donne la façon dont varie la pression à l'intérieur de l'étoile :

so verwandeln sich die Gleichungen (13), (26), (10), (24), (25) durch elementare Rechnung in die folgenden:

$$f_2 = \frac{3}{\varkappa\rho_0}\sin^2\chi\,, \quad f_4 = \left(\frac{3\cos\chi_a - \cos\chi}{2}\right)^2, \quad f_1 f_2^2 f_4 = 1\,. \qquad (29)$$

$$\rho_0 + p = \rho_0 \frac{2\cos\chi_a}{3\cos\chi_a - \cos\chi} \qquad (30)$$

$$3x = r^3 = \left(\frac{\varkappa\rho_0}{3}\right)^{-3/2}\left[\frac{9}{4}\cos\chi_a\left(\chi - \frac{1}{2}\sin 2\chi\right) - \frac{1}{2}\sin^3\chi\right]. \qquad (31)$$

Die Konstante χ_a bestimmt sich aus Dichte ρ_0 und Radius r_a der Kugel nach der Relation:

En faisant réapparaître la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide, prisé égale à 1 par Schwarzschild :

$$p = \rho_0 c_0^2 \; \frac{\cos\chi - \cos\chi_a}{3\cos\chi_a - \cos\chi}$$

Une pression qui est nulle à la surface d'étoile et qui, comme la vitesse de la lumière devient infinie au centre quand le rayon de l'étoile atteint la même valeur critique. Ceci correspond à la même valeur du rayon critique, indiquée plus haut.

On se rappellera que la pression, outre qu'elle représente une mesure de force par unité de surface, est aussi une densité volumique d'énergie.

On voit donc qu'il est impossible de concevoir un ensemble solution intérieure – solution extérieure de l'équation d'Einstein susceptible de décrire la géométrie à l'intérieur et à l'extérieur d'une étoile à neutrons dont la masse dépasse 2.5 masses solaires, sinon la pression et la vitesse de la lumière deviennent infinies en son centre.

Il conviendrait donc de s'interroger sur ce point précis.

Depuis plus de cinquante ans les cosmologistes et les astrophysiciens ont fait la plus complète impasse sur cette question. Mais ça n'est pas la première fois que cela se produit. Nous avons vu, avec cette question de l'antimatière primordiale, que quand les théoriciens n'entrevoient aucune possibilité de gérer un problème, ils le mettent tout simplement sous le tapis.

Chapitre 6 :

L’engendrement d’une chimère.

Retour en 1916. Dans les pages précédents ont été évoqués l'excellente compréhension des articles de Schwarzschild publiée par le jeune Ludwig Flamm ainsi que le constat de Schwarzschild, de l'existence d'une criticité physique apparaissant lors qu'une masse est confinée dans un certain volume.

On sait qu'Albert Einstein avait des difficultés avec les mathématiques. Mais c'était avant tout un extraordinaire physicien. Ainsi, quand on rassemble Einstein, Schwarzschild, Flamm et quelques autres, cela donne ce qui se passe quand on introduit en physique des outils fraichement construits par les mathématiciens.

Inversement, les écrits de Hilbert traduisent la démarche inverse, quand un mathématicien s'aventure dans la jungle de la physique.

On sait que c'est à la suite de nombreux échanges avec Einstein que ce génie des maths qu'était David Hilbert comprit qu'il pouvait s'avérer intéressant de mettre un peu d'ordre dans certains développement théoriques, concernant la physique. Hilbert collabora pendant de longues années avec le mathématicien Richard Courant. Tous les deux s'associèrent dans la rédaction d'un traité de 1000 pages, publiée en 1924 intitulé « Méthodes mathématiques de la physique » qui fit date en son temps. Dans ce livre ils montrent comment les méthodes variationnelles sont omniprésentes en physique. Mais cette collaboration prit fon avec le départ de Courant pour des Etats-Unis qui, bien sûr, était Juif.

A propos de cette diaspora de mathématiciens et de physiciens, le plus souvent vers les Etats-Unis citons une anecdote qui n'est pas sans saveur.

Quand l'université de Göttingen, où il occupe la prestigieuse chaire d'enseignement des mathématiques, se vide de tous ses Juifs, Hilbert ne peut qu'observer ce qu'il vite comme une véritable catastrophe. Il reçoit un jour la visite de Bernhardt Rust, ministre de la science. Un Nazi fanatique, qui se suicidera en 1945. On rapporte le dialogue suivant :

David Hilbert en 1934

Bernhard Rust en 1934.

Rust : *Professeurs Hilbert, est-ce que votre université a beaucoup souffert du départ des Juifs ?*

Hilbert : *Nein, nein …*

Rust : *Ah bon ! Elle n'a pas souffert ?*

Hilbert : *Non elle n'existe plus, c'est tout …*

Que devient cette nouvelle cosmologie ?

Einstein émigre aux Etats-Unis en 1933. Il tentera jusqu'à sa mort, sans succès, d'intégrer l'électromagnétisme dans son modèle cosmologique, rêvant d'une «théorie des champs unifiés ».

Schwarzschild étant décédé dès 1916, que reste-t-il de ses travaux ? Hermann Weyl, comme Flamm et d'autres, ont envisagé que la solution extérieure puisse avoir partie liée avec une vision topologique des masses, si on décidait de la considérer comme une sorte de pont mettant deux structures d'espace-temps en communication.

Les solutions mathématiques de genre [36] ont cette propriété de pouvoir a priori être exprimée dans de multiples choix des coordonnées. Mais comme il s'agit de solutions qu'on souhaite liées à la physique elles subissent alors quelques contraintes. L'une d'elles se réfèrent aux conditions aux limites, à l'infini. La solution extérieure de Schwarzschild traduit la structuration du champ autour d'une masse. Ce champ gravitationnel ne se propage pas à l'infini A grande distance, il peut être considéré comme nul. La géométrie doit alors correspondre à celle d'un vide relativiste. Il est alors décrit par la métrique de Lorentz ;

$$ds^2 = c^2\, dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

Un changement de coordonnées permet son expression en coordonnées polaires :

$$ds^2 = c^2\, dt^2 - dr^2 - r^2\, (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2)$$

Si une « solution extérieure » est exprimée dans un jeu de coordonnées qui semblent proches de ces coordonnées polaires on demandera donc à cette expression (métrique) de tendre vers la métrique de Lorentz à l'infini.

En 1934 Albert Einstein et Nathan Rosen [37] se hasardent, eux aussi, dans cette tentative de description des particules à travers le topologie.

Un article téléchargeable à l'adresse :

---

[36] Qu'o appelle « des métriques »

[37] Cosignataire de l'article sur « le paradoxe d'Einstein, Podowlski-Rosen. » Maus ceci est une autre histoire.

http://www.jp-petit.org/papers/cosmo/1935-Einstein-Rosen.pdf

JULY 1, 1935 PHYSICAL REVIEW VOLUME 48

The Particle Problem in the General Theory of Relativity

A. EINSTEIN AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton*

(Received May 8, 1935)

The writers investigate the possibility of an atomistic theory of matter and electricity which, while excluding singularities of the field, makes use of no other variables than the $g_{\mu\nu}$ of the general relativity theory and the φ_μ of the Maxwell theory. By the consideration of a simple example they are led to modify slightly the gravitational equations which then admit regular solutions for the static spherically symmetric case. These solutions involve the mathematical representation of physical space by a space of two identical sheets, a particle being represented by a "bridge" connecting these sheets. One is able to understand why no neutral particles of negative mass are to be found. The combined system of gravitational and electromagnetic equations are treated similarly and lead to a similar interpretation. The most natural elementary charged particle is found to be one of zero mass. The many-particle system is expected to be represented by a regular solution of the field equations corresponding to a space of two identical sheets joined by many bridges. In this case, because of the absence of singularities, the field equations determine both the field and the motion of the particles. The many-particle problem, which would decide the value of the theory, has not yet been treated.

En lisant le résumé on comprend immédiatement l'origine de la motivation de tous ceux qui tentent de modéliser les particules de manière topologique. Une masse génère un champ gravitationnel. Une charge électrique génère un champ électrique. Tous les deux sont newtoniens, en $1/r^2$. Si les particules sont assimilées à des points ces champs deviennent infinis. En donnant à ces particules une autre topologie on fait disparaître ces infinis.

Einstein et Rosen utilisent un changement de variable très simple [38] :

$$(t , r , \theta , \varphi) \rightarrow (r , u , \theta , \varphi)$$

$$r = R_s + u^2$$

On notera que ce changement de variable matérialise la contrainte

$$r>R_s$$

Dans le résumé, on trouve les phrases :

« *Ces solutions impliquent une représentation mathématique de l'espace de la physique en tant qu'espace constitué de deux feuillets identiques, une particule constituant une sorte de pont reliant ces deux feuillets* ».

Comment se transmettent les essais des différents scientifiques ? Ceux-ci sont d'abord publiés dans des revues spécialisées. Aujourd'hui l'anglais s'est imposé comme langue commune, mais du temps de Schwarzschild les allemands publiaient leurs travaux en allemand, dans des revues spécialisées allemandes, dont le lectorat était limité à la sphère germanophone.

[38] Mais en transformant ainsi la solution de Schwarzschild on notera que son expression ne s'identifie plus avec la métrique de Lorentz à l'infini.

Les auteurs de ces articles disposaient alors de « tirés à part », c'est à dire d'un certain nombre, limité à une douzaine en général, d'ensembles de feuillets imprimés représentant leur article. Ils pouvaient alors faire parvenir ces copies de leur article à des correspondants, par voie postale. [39]

Quand Einstein arrive aux Etats-Unis, au début des années trente, il est porteur cela permet aux scientifiques américains qui lisent l'allemand de prendre connaissance de ces travaux. [40] Parmi ces lecteurs deux personnages qui vont alors jouer un rôle essentiel. Il y a d'abord le mathématicien Richard Tolman qui va puiser ces informations directement auprès d'Einstein lui-même.

Richard Tolman et Albert Einstein

Quand Einstein s'installe aux Etats-Unis, en acceptant un poste dans le prestigieux Institut des Sciences avancées de Princeton il a 54 ans. Tolman a 52 ans.

Tolman a donc déjà une grande partie de sa carrière de scientifique derrière lui. Dans ces années trente il achève la rédaction d'un ouvrage consacré à la thermodynamique. Il décide alors d'adjoindre à son manuscrit ces aspects de cosmologie. Le livre paraît en 1934 :

[39] Un système qui a été la règle, tant que le système de messagerie électronique ne lui a pas été substitué.
[40] Rappelez-vous que la traduction anglaise du premier article de Schwarzschild n'a été disponible, dans des ouvrages publiés par une maison d'édition, qu'en 1975. Pour le second article, celui de février 1916, il faudra attendre 1999.

Dans ce livre Tolman n’évoque que la première solution de Schwarzschild, celle qui décrit la géométrie à l’extérieur des masses Il remplace alors la lettre a , désignant la longueur de Schwarzschild par 2m, en se rappelant que cette lettre m désigne cette fois une longueur, et non une masse. En fait cette façon d’écrire cette quantité revient à remplacer la constante de la gravitation G et la vitesse de la lumière c par l’unité.

$$R_s = \frac{2Gm}{c^2} \longrightarrow 2m$$

Il comment alors une erreur qui ne sera pas sans conséquences. Non seulement il remplace la « grandeur intermédiaire » R de Schwarzschild par la lettre r, mais il omet d’indiquer la contrainte qui accompagne ce changement de notation.

370 RICHARD C. TOLMAN

where λ and ν are functions of r. Outside the sphere, we may take the solution as described by a line element of the simple Schwarzschild form

$$ds^2 = -\frac{dr^2}{1-2m/r} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2 + \left(1-\frac{2m}{r}\right)dt^2, \quad (5.2)$$

which arises from the full expression for the Schwarzschild-de Sitter solution (4.2), when we set $\Lambda = 3/R^2 = 0$ in agreement with the known fact that the cosmological constant is too small

spheres surrounded
these equations, it
(5.3) as determinin
of fluid in terms of
the expressions for
(5.1). Eq. (5.4) may
a condition which
appearing in e^ν wit
condition which ca
since it will be note
arbitrary as to a m
Eq. (5.5) may then
of the gravitationa
terms of r_b and th
will be noted from

L’erreur de Tolman

Il manque en effet la mention :

$$ds^2 = -\frac{dr^2}{1-2m/r} - r^2 d\theta^2 \qquad r \geqslant 2m$$

$$- r^2 \sin^2\theta d\phi^2 + \left(1-\frac{2m}{r}\right)dt^2, \quad (5.2)$$

Un oubli qui va avoir des conséquences incalculables, pendant près d’un siècle.

Le second personnage qui se familiarise avec ces écrits allemands est le jeune Robert Oppenheimer. En ce début des années trente il n’a pas trente ans. Issu d’une famille fortunée, après avoir fait de brillantes études aux Etats-Unis, il séjourne en Allemagne, précisément dans ce cœur de la physique théorique de l’époque qu’est l’université de Göttingen [41] , où il acquiert un complément de connaissances théoriques. Comme Tolman, il lit et parle couramment l’allemand. En Allemagne il soutient une thèse de doctorat sous la direction du physicien Max Born (qui a le même âge que lui). Puis il rentre aux Etats-Unis. &

[41] A cette époque, celui qui veut se plonger dans les travaux de physique et de cosmologie doit impérativement maîtriser la langue allemande.

Oppenheimer et Einstein.

Le livre de Tolman va avoir un impact considérable aux Etats-Unis. Acquis par toutes les bibliothèques universitaires il devient immédiatement la Bible pour ceux qui entreprennent de se tourner vers la cosmologie.

Tolman et Oppenheimer publient ensuite, dans la même revue Physical Review et dans le même numéro, celui du 15 février 1939, des articles où ils reprennent la solution intérieure développée par Karl Schwarzschild. En fait, ils se connaissent se fréquentent et, plutôt que de publier ensemble un article, et plutôt que d'être en concurrence ils décident de publier chacun leur propre article, dans la même revue, à la même date.

Voici d'abord l'article de Tolman :

FEBRUARY 15, 1939 PHYSICAL REVIEW VOLUME 55

Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid

Richard C. Tolman
Norman Bridge Laboratory of Physics, California Institute of Technology, Pasadena, California
(Received January 3, 1939)

A method is developed for treating Einstein's field equations, applied to static spheres of fluid, in such a manner as to provide explicit solutions in terms of known analytic functions. A number of new solutions are thus obtained, and the properties of three of the new solutions are examined in detail. It is hoped that the investigation may be of some help in connection with studies of stellar structure. (See the accompanying article by Professor Oppenheimer and Mr. Volkoff.)

§1. Introduction

It is difficult to obtain explicit solutions of Einstein's gravitational field equations, in terms of known analytic functions, on account of their complicated and nonlinear character. Even in the physically simple case of static gravitational equilibrium for a spherical distribution of perfect fluid, there are only two explicit solutions which are at present well known. These are Einstein's original cosmological solution for a uniform distribution of fluid with constant density ρ and constant pressure p throughout the whole of space, and Schwarzschild's so-called interior solution for a sphere of incompressible fluid of constant density ρ and a pressure p which drops from its central value to zero at the boundary.[1] To these, by regarding empty space as the limiting case of a fluid having zero density and pressure, we can also add de Sitter's cosmological solution for a completely empty universe, and Schwarzschild's so-called exterior solution for the field in the empty space surrounding a spherically symmetrical body, thus giving four solutions in all.

The present paper has a twofold purpose. In the first place, a method will be given for treating

[1] In addition to these explicit solutions for a spherical distribution of fluid, we also have Lemaitre's interesting explicit solution for a spherical distribution of solid, each concentric layer of which supports its own weight by purely transverse stresses. See Eq. (5.11), Ann. de la Soc. Scient. de Bruxelles **A53**, 51 (1933).

http://www.jp-petit.org/papers/cosmo/1939-Tolman/pdf

Puis celui d'Oppenheimer, publié avec George Volkoff.

FEBRUARY 15, 1939 PHYSICAL REVIEW VOLUME 55

On Massive Neutron Cores

J. R. Oppenheimer and G. M. Volkoff
Department of Physics, University of California, Berkeley, California
(Received January 3, 1939)

It has been suggested that, when the pressure within stellar matter becomes high enough, a new phase consisting of neutrons will be formed. In this paper we study the gravitational equilibrium of masses of neutrons, using the equation of state for a cold Fermi gas, and general relativity. For masses under $\frac{1}{3}\odot$ only one equilibrium solution exists, which is approximately described by the nonrelativistic Fermi equation of state and Newtonian gravitational theory. For masses $\frac{1}{3}\odot < m < \frac{3}{4}\odot$ two solutions exist, one stable and quasi-Newtonian, one more condensed, and unstable. For masses greater than $\frac{3}{4}\odot$ there are no static equilibrium solutions. These results are qualitatively confirmed by comparison with suitably chosen special cases of the analytic solutions recently discovered by Tolman. A discussion of the probable effect of deviations from the Fermi equation of state suggests that actual stellar matter after the exhaustion of thermonuclear sources of energy will, if massive enough, contract indefinitely, although more and more slowly, never reaching true equilibrium.

I. Introduction

For the application of the methods commonly used in attacking the problem of stellar structure[1] the distribution of energy sources and their dependence on the physical conditions investigation would afford some insight into the more general situation where the generation of energy is taken into account. Although such a model gives a good description of a white dwarf star in which most of the material is supposed to be in a degenerate state with a zero point energy

http://www.jp-petit.org/papers/cosmo/1939-Oppenheimer-Volkoff.pdf

L’article de Tolman se concentre sur l’aspect mathématique de la solution. Dans la forme retenue de la métrique, qu’il s’agisse de la métrique extérieure comme de la métrique intérieure, Tolman ramène le problème à la détermination de deux fonctions inconnues de la variable r :

λ (r) et ν (r)

Ces deux fonctions sont les exposants de deux fonctions exponentielles présentes dans la solution :

In the first place, since the condition of gravitational equilibrium for a fluid will on physical grounds be a static and spherically symmetrical distribution of matter, we can begin by choosing space-like coordinates r, θ and ϕ, and a time-l coordinate t such that th lution will be descr d by the simple form of e element

$$ds^2 = -e^{\lambda}dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2 + e^{\nu}dt^2, \quad (2.2)$$

with λ and ν functions of r alone, as is known to be possible in the case of any static and spherically symmetrical distribution of matter. With the simple expressions for the gravitational potentials appearing in (2.2), the application of the field equations (2.1) then leads to the following expressions for the only surviving components of

Même approche chez Oppenheimer et Volkoff :

II. Relativistic Treatment of Equilibrium

It is known[5] that the most general static line element exhibiting spherical symmetry may be expressed in the form

$$ds^2 = -e^{\lambda}dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2 + e^{\nu}dt^2, \quad \lambda = \lambda(r), \quad \nu = \nu(r). \quad (1)$$

If the matter supports no transverse stresses and has no mass motion, then its energy momentum tensor is given by[6]

Les fonctions exponentielles sont strictement positives. Ainsi Tolman, Oppenheimer et Volkoff expriment-ils implicitement l'invariance de la signature de la solution (la suite des signes des termes qui la composent). La solution fait donc apparaître l'équation d'état, l'évolution de la pression à l'intérieur de l'étoile, sous forme d'une équation différentielle [42] .

Nous sommes en 1939. Le neutron a été découvert en 1932. Très vite on imagine que les étoiles massives puissent évoluer en donnant naissance à des étoiles à neutrons. Dans leur article Oppenheimer et Volkoff s'interrogent sur la stabilité de tels objets. Ce qui amène Robert Oppenheimer à publier quelques mois plus tard, en septembre 1939 un second article avec Hartland Snyder :

http://www.jp-petit.org/papers/cosmo/1939-Oppenheimer-Snyder.pdf

SEPTEMBER 1, 1939 PHYSICAL REVIEW VOLUME 56

On Continued Gravitational Contraction

J. R. OPPENHEIMER AND H. SNYDER
University of California, Berkeley, California
(Received July 10, 1939)

When all thermonuclear sources of energy are exhausted a sufficiently heavy star will collapse. Unless fission due to rotation, the radiation of mass, or the blowing off of mass by radiation, reduce the star's mass to the order of that of the sun, this contraction will continue indefinitely. In the present paper we study the solutions of the gravitational field equations which describe this process. In I, general and qualitative arguments are given on the behavior of the metrical tensor as the contraction progresses: the radius of the star approaches asymptotically its gravitational radius; light from the surface of the star is progressively reddened, and can escape over a progressively narrower range of angles. In II, an analytic solution of the field equations confirming these general arguments is obtained for the case that the pressure within the star can be neglected. The total time of collapse for an observer comoving with the stellar matter is finite, and for this idealized case and typical stellar masses, of the order of a day; an external observer sees the star asymptotically shrinking to its gravitational radius.

Cet article est considéré comme fondateur de la théorie des trous noirs.

Nos avons considéré, plus haut, le devenir d'une étoile à neutrons progressant, lentement mais sûrement, vers une criticité physique. Oppenheimer et Volkoff envisager un scénario vu sous un angle plus catastrophique et brutal. Reprenons le scenario de la fin de vue d'une étoile massive. Pendant sa vie elle a synthétisé des atomes de plus en plus lourds, bien au-delà de l'hélium et du carbone. . Ces produits de réaction, plus lourds, se sont accumulés à des profondeurs dépendant de leurs masses. L'étoile a ainsi acquis une structure évoquant celle d'un oignon.

[42] A laquelle on donnera le nom d'équation TOV (pour « Tolman-Oppenheimer-Volkoff »).

Structure interne d’une étoile massive. En bleu, son cœur de fer.

En s’enfonçant dans l’étoile on trouve d’abord de l’hélium, puis l’oxygène et du carbone. Puis successivement du Néon, du Magnésium, du soufre et du silicium. Les réactions conduisant au fer sont les dernières qui dégagent de l’énergie. Ce fer se comporte ainsi que une « « cendre » des réactions de fusion.

Soudain l’étoile manque de « carburant de fusion ». Cette pénurie survient extrêmement brutalement. Le système se comporte alors comme un soufflé, dans un four, dont le cuisinier aurait brutalement interrompu le chauffage, en outre en ouvrant a porte du four. Comme le soufflé, l’étoile s’effondre sur elle-même, à très grande vitesse. Toute cette matière va donc frapper très violemment le noyau de fer central.

Le choc est tel que les atomes de fer sont immédiatement disloqués en neutrons, protons et électrons. La compression se produisant, les électrons et les protons disparaissent, dans la partie centrale de l’objet.

Mais pourquoi n’y a-t-il pas de rebond ?

Imaginez que vous tapiez sur un bloc de fer avec un puissant marteau. Ce bloc de fer va réagir. Après avoir subi la force du choc il réagira en communiquant à votre marteau une certaine impulsion, qui le fera rebondir. Les forgerons en sont les témoins, quand ils frappent sur un morceau de fer qui n’a pas encore acquis une plasticité par chauffage.

Mais si vous frappez sur un bloc de pâte à modeler, le marteau ne réagit pas. L’énergie cinétique du marteau a été utilisée par déformer la masse de pâte à modeler. Nous sommes face à une compression inélastique. Ca sera la même chose avec la compression du noyau de fer situé au centre de l’étoile massive. L’énergie cinétique correspondant à la chute quasi libre de la masse de l’étoile n’entraînera pas de rebond, parce que l’objet ainsi formé se débarrasse de l’énergie, qui est alors emportée par les neutrinos issus de la réaction. Ceux-ci, Interagissant très faiblement avec la matière, peuvent ainsi disperser cette énergie à l’extérieur de l’étoile.

L'étoile à neutrons se forme quand ceux-ci exercent les uns sur les autres une contrepression suffisante pour s'opposer à l'effondrement. L'image didactique est celle d'un empilement d'ampoules électriques dans une mine. &

On conçoit qu'on ne peut entasser des objets les uns contre les autres indéfiniment. Surviendra immanquablement un moment où le verre des ampoules ne pourra plus résister à la pression qu'exercent celles-ci les uns sur les autres.

La situation qu'on envisagé Oppenheimer et Snyder est donc cette où une étoile massive subit un effondrement complet, sans que la matière, fusse-t-elle réduite à l'état de neutrons, ne puisse s'opposer à ce mouvement de convergence vers le centre géométrique de l'étoile. Le modèle auquel ils se réfèrent est celui du collapse d'une boule faite de poussière (où les particules sont immobiles les unes par rapport aux autres, ce qui revient à négliger la température absolue de ce « gaz » et donc sa pression. L'effondrement tend donc à s'accélérer. Les auteurs supposent alors que la géométrie à l'extérieur de cet astre en effondrement peut être décrite par la solution extérieure de Schwarzschild. En effet cette solution restera la même quel que soit de degré de concentration de cette masse M. Or c'est cette valeur, constante, de la masse, qui donne la grandeur caractéristique, la longueur de Schwarzschild.

Se pose alors le problème de l'acheminement de l'information en direction d'un observateur extérieur, distant. Considérons cette solution de Schwarzschild telle qu'utilisée par exemple par Tolman :

370 RICHARD C. TOLMAN

where λ and ν are functions of r. Outside the sphere, we may take the solution as described by a line element of the simple Schwarzschild form

$$ds^2 = -\frac{dr^2}{1-2m/r} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2 + \left(1-\frac{2m}{r}\right)dt^2, \quad (5.2)$$

which arises from the full expression for the Schwarzschild-de Sitter solution (4.2), when we set $\Lambda = 3/R^2 = 0$ in agreement with the known fact that the cosmological constant is too small

spheres surrounded
these equations, it
(5.3) as determinin
of fluid in terms of
the expressions for
(5.1). Eq. (5.4) may
a condition which
appearing in e^ν wit
condition which ca
since it will be note
arbitrary as to a m
Eq. (5.5) may then
of the gravitationa
terms of r_b and th
will be noted from

Considérons des trajectoires radiales et faisons réapparaître la vitesse de la lumière :

$$ds^2 = \left(1-\frac{2m}{r}\right)c^2 dt^2$$

Comparons temps propre, à gauche et évolution de la coordonnée de temps choisie t , pour un objet immobile : r constant .

$$\tau = \sqrt{1-\frac{2m}{r}}\ t$$

Même chose, au même instant t pour un observateur situé à grande distance (r infini):

$$\tau_o = t$$

Oppenheimer en déduit que t est le temps propre d'un observateur distant. Or en matière de géométrie différentielle seul le temps propre est pertinent, les coordonnées n'étant que des moyens de repérage des points dans l'hypersurface.

On découvre ici le phénomène de Redshift gravitationnel. Le temps ne s'écoule pas au même rythme au voisinage des masses : il s'écoule plus lentement. C'est un des aspects de la relativité générale sur lequel nous pouvons avoir confiance. En effet il a été expérimentalement vérifié pour deux points situés à des distances différentes du centre de la masse de la Terre [43] .

[43] Expérience menée à bien en 1960 par Pound et Rebka.

Un observateur distant, recevant un rayon lumineux émis à distance r d'une masse, avec une longueur d'onde λ_o, percevra un signal de longueur d'onde :

$$\lambda_o = \frac{\lambda_e}{\sqrt{1 - \frac{2m}{r}}}$$

Si le signal est émis en un point correspondant à la valeur r = 2m (depuis la sphère de Schwarzschild, l'effet de Redshift gravitationnel est alors infini. L'objet semblera n'émettre aucune lumière et paraître « noir ».

Poussant plus loin ce raisonnement Oppenheimer et Snyder disent :

- Peu importe ce qui se déroule à l'intérieur de cette sphère, nous ne pouvons pas avoir la moindre information sur ce qui se passe à l'intérieur, par exemple le collapse d'une masse, totalement déstabilisée.

Cette sphère de Schwarzschild est ainsi rebaptisée « horizon des évènements ». Ils parviennent ainsi à utiliser la solution extérieure, stationnaire, pour décrire un phénomène qui est en fait hautement instationnaires. Leur calcul du collapse complet d'un astre ayant une masse stellaire se chiffrant en jours. En allant plus loin ils se fonde sur le temps de chute libre d'une masse témoin vers cette sphère de Schwarzschild. Si ce temps, décompté en temps propre (un temps attaché à cette masse témoin) est fini, par contre il devient infini si on le mesure avec la coordonnée de temps t, qui est alors censée correspondre au temps propre vécu par un observateur distant.

On montrera beaucoup plus loin que cette mesure du temps à l'aide de la coordonnée t figurant dans cette expression de la solution repose sur une hypothèse qui pouvait sembler être naturelle : l'absence de terme croisé en drdt dans la forme de la solution. Comme montré par le mathématicien français Pascal Koiran, ce temps devient fini si on introduit cette forme de solution. Nous reporterons cette discussion à plus tard.

Pendant la seconde guerre mondiale Robert Oppenheimer se détourna de ces considérations sur la fin de vie des étoiles massives pour se tourner vers des vérifications expérimentales de la mécanique quantique opérées lors de spectaculaires expériences de plein air.

Pendant cette époque Richard Toman occupe la place de conseiller scientifique du général Leslie Groves, responsable du projet Manhattan.

Après la guerre Oppenheimer n'a guère l'occasion de revenir à ces considérations cosmologiques. En Effet, étant données ses réticences vis-à-vis du passage de la bombe A à la bombe H il a maille à partir avec les autorités américaines. Quant à Tolman, malade, il décède en 1948 à 67 ans.

C'est le moment où des scientifiques reprennent ces questions de devenir des étoiles à neutrons massives. Au centre de cette reprise, John Archibald Wheeler.

Wheeler a lui aussi participé activement, comme jeune théoricien rôdé à la mécanique quantique, au projet Manhattan. A la différence d'Oppenheimer il participera sans états d'âme au développement de l'arme thermonucléaire. Au moment de la guerre du Vietnam,

qui se prolongera jusqu'en 1975, un comité Jason sera fondé, dans le cadre duquel on demandera aux scientifiques de mettre à profit leur créativité pour permettre au conflit d'aboutir favorablement. Wheeler prendra une part active dans ce comité, de même que le physicien théoricien Murray Gell-Man [44] . En même temps Wheeler participe au développement des futurs réacteurs nucléaires à applications civiles.

Hyperactif Wheeler occupera un poste de professeurs à l'Institut des Etudes avancées de Princeton et dirigera 48 thèses de doctorat, dont celle de son élève Kip THorne. Son imagination est sans limite et se tourne vers de multiples secteurs scientifiques. Grand communicant, il n'oublie pas à chaque fois de marquer ses idées à l'aide de mots. En mécanique quantique il invente de concept de « mousse quantique ». En géométrie il décide de donner un nom à l'espace des solutions métriques, qui devient celui de la « géométrodynamique ». Mais dès qu'il porte son attention sur des écrits de relativité générale il rebaptise le pont D'Einstein-Rosen « wormhole » : trou de ver.

Son attention se centre alors sur l'article publié par Oppenheimer en 1939. Des prédécesseurs avaient imaginé les nom « corps de Schwarzschild » ou de « collapsar ». En donnant à cette théorie le nom de « Trou Noir » Wheeler lui confère aussitôt un succès planétaire.

A cette époque, et jusqu'à aujourd'hui, personne ne prête plus attention au second article de Schwarzschild [45] . Tous ont fait leurs premières armes dans l'ouvrage publié en 1934 par Richard Tolman. En conséquence de quoi la formulation s'écrit, dans tous les articles et livres :

370 RICHARD C. TOLMAN

where λ and ν are functions of r. Outside the sphere, we may take the solution as described by a line element of the simple Schwarzschild form

$$ds^2 = -\frac{dr^2}{1-2m/r} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta d\phi^2 + \left(1-\frac{2m}{r}\right)dt^2, \quad (5.2)$$

which arises from the full expression for the Schwarzschild-de Sitter solution (4.2), when we set $\Lambda = 3/R^2 = 0$ in agreement with the known fact that the cosmological constant is too small

spheres surrounded
these equations, it
(5.3) as determinin
of fluid in terms of
the expressions for
(5.1). Eq. (5.4) may
a condition which
appearing in e^ν wit
condition which ca
since it will be note
arbitrary as to a m
Eq. (5.5) may then
of the gravitationa
terms of r_b and th

Une question est alors sur toutes les lèvres :

[44] A qui l'on doit le modèle des quarks.
[45] Lequel, rappelons-le, ne sera traduit en anglais qu'en 1999 !

- Comment les choses se présentent-elles à l'intérieur de ces trous noirs, pour $r < 2m$?

Encore aujourd'hui, très peu de « spécialistes des trous noirs » connaissent l'existence de ce second article, moins encore ceux qui ont eu accès à son contenu, et aucun dont l'attention ait été attirée par la variation de la vitesse de la lumière découvert par Schwarzschild en 1916.

Cette folie collective touche tous ceux qui s'intéressent à ce nouveau domaine, échappant totalement à l'observation.

Avant de recenser les dérives qui ont donné naissance au modèle du trou noir, véritable chimère, il est bon d'évoquer la situation générale de la recherche théorique mondiale après les années soixante-dix.

On est face à une crise planétaire, généralisée.

Pour s'en rendre compte il suffit de se demander quel théoricien de l'époque actuelle laissera un nom dans l'histoire des sciences ?

Autre fait marquant. Dans l'époque précédente se tenait, depuis 1911, un colloque Solvay. . Ci-après les participants de ce premier congrès, historique :

1 Walther Nernst 2 Robert Goldschmidt 3 Max Planck 4 Marcel Brillouin 5 Heinrich Rubens 6 Ernest Solvay 7 Arnold Sommerfeld 8 Hendrik Antoon Lorentz 9 Frederick Lindemann 10 Maurice de Broglie 11 Martin Knudsen 12 Emil Warburg 13 Jean-Baptiste Perrin 14 Friedrich Hasenöhrl 15 Georges Hostelet 16 Édouard Herzen 17 James Hopwood Jeans 18 Wilhelm Wien 19 Ernest Rutherford 20 Marie Curie 21 Henri Poincaré 22 Heike Kamerlingh Onnes 23 Albert Einstein 24 Paul Langevin

Ci-après le congrès de 1927, 16 ans plus tard :

Colloque Solvay 1927

Sur cette image :

Au premier rang : Planck, Marie Curie, Lorentz, Einstein, Langevin.

Au second rang : Niels Bohr, Max Born de Broglie Compton, Dirac

Au troisième rang : Henisenberg, Pauli.

Dans l'après-guerre se tinrent encore quelques colloques Solvay, dont personne ne conserva le moindre souvenir, un des derniers ayant pour thème « les grands problèmes de la cosmologie et de l'astrophysique ».

Aujourd'hui ces colloques ont tout simplement disparu du panorama scientifique.

Autre signe : Allez chercher les physiciens en poste à l'Institut des Sciences avancées de Princeton. Vous n'y trouverez qu'une poignée de spécialistes de la théorie des cordes. Pour la cosmologie : Juan Maldacena, pionnier dans cette nouvelle discipline : la thermodynamique des trous noirs.

Juan Maldacena, médaille Galileo 2019

Un institut qui a été dirigé de 2012 à 2022 par un hollandais :

Robbert Dijkgraaf, qui dirigea l'Institut des Sciences avancées
de Princeton de 2012 à 2022. Prix Spinoza 2003.

Auteur de 70 articles sur la théorie des cordes, de retour sans son pays d'origine, à 62 ans il est ministre de l'enseignement et de la culture.

L’institut des Sciences Avancées de Princeton.
Un sanctuaire de la science que Dieu semble avoir renoncé à visiter.

Beaucoup de théoriciens disent travailler dans un nouveau domaine : la gravitation quantique. Une revue a même été créée pour publier les avancées dans ce domaine :

Classical and
Quantum Gravity

Volume 29 Number 24 21 December 2012

An international journal of gravitational physics, cosmology, geometry and field theory

Focus section
Non-astrophysical numerical relativity
Guest Editors: David Garfinkle and Luis Lehner

iopscience.org/cqg

IOP Publishing

Qu'est-ce que cette nouvelle discipline ? Renseignons-nous. Elle a un but : unifier la gravitation et la mécanique quantique. Mais ce n'est qu'un projet. En effet personne à ce jour n'est parvenu à quantifier la gravitation [46] . En ce sens cette publication pourrait être qualifiée de … projet de revue. Mais non. Les articles y sont filtrés par les nouveaux spécialistes de gravitation quantique. Tout ce qui ne cadre pas avec les sévères critères de sélection de la revue est immédiatement rejeté.

Qu'on produit de concret les spécialistes de cette nouvelle discipline ? : rien. Cela rappelle la nouvelle de Hans Christian Andersen où un tailleur crée pour le roi des vêtements si beaux que seuls des gens de qualité peuvent les voir. Tous les courtisans de la cour commentent dès lors leur incomparable beauté. Les mots leur manquent pour décrire ce qu'ils prétendent voir Aucun ne veut rester silencieux face à ce spectacle, de peur d'être qualifié de personnage de second rang. Jusqu'à ce qu'un enfant s'écrie :

- *Le roi est nu !*

---

[46] Dans la suite du livre je présenterai les arguments en faveur de ce qui pourrait permettre de dénouer cette situation et enfin quantifié le champ gravitationnel : Introduire des masses négatives dans le modèle cosmologique.

Mais la machine « physique théorique, cosmologie, astrophysique théorique » doit continuer de fonctionner. Il y a des enseignements à assurer, des chaires à pourvoir, des sujets de thèses de doctorat à présenter. Les revues assurant la publication des articles dans ces disciplines doivent pouvoir remplir les pages de leurs numéros. Il faut également récompenser les auteurs d'avancées significatives par des prix. Il faut également justifier les crédits octroyés pour payer les salaires, financer les recherches et les participations à des colloques scientifiques.

En outre il faut entretenir une image d'excellence auprès du public. Cela sera la tâche des revues de vulgarisation scientifique. Elles sont aujourd'hui puissamment secondées par les scientifiques qui assurent la promotion d'une véritable science virtuelle, grâce aux images de synthèse qu'ils créent à l'aide d'ordinateurs de plus en plus puissants. La précision de telles images est devenue telle que non seulement le public les confond avec la réalité, mais les scientifiques eux-mêmes, séduits par leurs réalisations, finissent également par confondre réalité et illusion.

Bref :

- Au royaume des aveugles, les borgnes sont rois.

C'est une prise de conscience vertigineuse. Les premier qui refusent d'envisager une telle faillite sont les scientifiques eux-mêmes. Et c'est logique : Si la réalité est aussi déprimante, alors ils ont partie liée avec cette situation. Leurs statuts, l'ensemble de leur carrière et de leurs travaux se trouvent remis en cause. Quel scientifique accepterait cela ?

Dans cette question de conformité de modèles théoriques avec les réalités, on a trois interlocuteurs :

Il y a ceux qui sont pour. Il y a ceux qui sont contre. Il y a enfin une troisième interlocutrice qui finit toujours par avoir le dernier mot :

La Nature

Celle-ci s’exprime à travers les observations et les expériences. Or, visiblement, depuis un demi-siècle, celle-ci boude. Elle refuse obstinément de confirmer les prédictions des théoriciens de la physique des particules. Voir l’échec total de la théorie de supersymétrie. Du côté des observations elle n’a fait qu’effondrer toutes les constructions théoriques laborieusement bâtie pendant les décennies précédentes. Il a fallu tenter de rafistoler les modèles en invoquant de nouveaux concepts, de nouveaux ingrédients de la « soupe cosmique » :

- Champ d’inflatons
- Matière sombre
- Energie noire

Des mots qui, au lieu de se référer à des éléments tangibles et identifiables font plus figure d’exorcisme qu’autre chose. C’est est au point où le modèle théorique présenté comme « standard » semble avec été créé, non par des théoriciens, mais par des cuisiniers.

Il restait le modèle des trous noirs, stellaires, minis, géants, de toutes tailles.

Soudain, en 2021, une équipe présente, avec une voix altérée par l’émotion, ce qui est présenté comme la première image d’un trou noir géant. En effet la mesure des vitesses d’étoiles circulant au centre des galaxies a montré que leurs vitesses très importantes ne pouvaient s’explique que si elles orbitaient autour d’objets dotés de masses considérables.

Les mesures de position et de vitesse de la dizaine d'étoiles circulant autour d'un centre de notre galaxie, la voie lactée.

Les points de couleur indiquent les moments où les données ont été captées, pendant plus de 20 ans, et les courbes traduisent les trajectoires képlériennes qui ont été déduites de ces observations. On en déduit que ces trajectoires traduisent la présence d'un objet supermassif, extrêmement compacte, situé à 26.000 années-lumière de la Terre, dont la masse estimée est de 4 millions de masses solaires.

Des mesures similaires trahissent la présence d'objets supermassifs au centre de très nombreuses galaxies. La galaxie M87 est située dans l'amas de la Vierge, à 50 millions d'années-lumière. C'est une galaxie de forme elliptique dont la masse est estimée à 200 fois celle de votre galaxie. C'est ce qu'on appelle « une galaxie active[47] », c'est-à-dire qu'elle porte en son centre un quasar[48]. Ces quasars émettent des jets de plasma, très fins, en général selon deux directions diamétralement opposées et perpendiculaire au plan de symétrie des galaxies. L'image ci-après montre un des jets émanant du quasar situé au centre de la galaxie M87.

[47] Ou « galaxie de Seyfert ».
[48] Dont il n'existe à ce jour aucun modèle théorique crédible.

Le quasar situé au cœur de la galaxie elliptique M87.

On ne peut obtenir sur une mêle image, dans une même gamme de longueurs d'ondes, qu'une image d'un seul des deux jets. Le second bascule dans l'infrarouge du fait de l'effet doppler. La matière qui est émise dans ce jet s'éloigne de nous.

Image d'artiste évoquant une galaxie active et son quasar.

La lumière émise par les jets étant fortement polarisée, ceci trahit la présente d'un très fort champ magnétique, dipolaire, qui oriente la direction des jets selon ses lignes magnétiques et assure leur collimation.

Que sont ces mystérieux quasars ? La réponse donnée par les théoriciens n'a que la forme d'une opinion. Quand celle-ci se trouve partagée par nombre d'entre eux elle prend la forme d'une nouvelle entité, faisant désormais partie du monde scientifique :

leconsensus

Dans le cas des quasars, ceci signifie que le phénomène quasar relèverait « de l'éjection de la matière collectée par un trou noir géant. » C'est « ce que pensent les spécialistes ».

Ajoutons que la mesure des fortes vitesses d'objets au centre de la galaxie M87 a permis d'évaluer la masse de l'objet hypermassifs situé en son centre : 6.5 milliards de masses solaires. On constatera au passage que celui-ci est plus de mille fois moins important que celui qui est situé au centre de la voie lactée, alors que la galaxie qui l'héberge est deux cent fois plus massive. Un mystère de plus.

Mais venons-en à cette image, présentée en 2021. Comment a-t-elle été créé ?

Depuis longtemps les astronomes savent qu'en conjuguant (à l'aide d'un traitement par ordinateur) les images fournies par deux instruments situés à une distance D l'un de l'autre, ils parviennent à recréer une image qui alors rejoindrait celle qui aurait pu être obtenue à l'aide d'un télescope de diamètre D. Or plus le diamètre de l'instrument est important et plus grand est son « pouvoir de résolution ». Ceci désigne la finesse du pinceau angulaire de la visée, le « pouvoir séparateur » de l'instrument .

Ceci vaut également pour les radiotélescopes. Un fantastique projet a alors vu le jour. Autant les activités des théoriciens sont pathétiques, autant celles des créateurs d'outils d'observation de plus en plus performants méritent tous les éloges. On a donc combiné les données collectées par des radiotélescopes situés à plus de dix mille kilomètres les uns des autres. Voici d'abord l'ensemble des radiotélescopes formant ce réseau EHT [49] .

[49] EHT : Event Horizon telecope.

Mais ces radiotélescopes ne peuvent conjuguer leurs données que s'ils sont situés sur un même hémisphère. Par exemple :

Conjugaison des données issues de 5 instruments
situés à Hawaï, aux Etats-Unis, au Mexique, Chili et Pôle Sud.

Ainsi les données conjuguées de ces cinq instruments permettent de reconstruire une image, telle qu'elle serait produite par un radiotélescope dont les collecter aurait une surface comparable à celle de la Terre. Ce travail représente le traitement par de puissants ordinateurs d'une masse considérable de données. Voici le résultat :

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 875:L1 (17pp), 2019 April 10
https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7

CrossMark

First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole

The Event Horizon Telescope Collaboration
(See the end matter for the full list of authors.)
Received 2019 March 1; revised 2019 March 12; accepted 2019 March 12; published 2019 April 10

Abstract

When surrounded by a transparent emission region, black holes are expected to reveal a dark shadow caused by gravitational light bending and photon capture at the event horizon. To image and study this phenomenon, we have assembled the Event Horizon Telescope, a global very long baseline interferometry array observing at a wavelength of 1.3 mm. This allows us to reconstruct event-horizon-scale images of the supermassive black hole candidate in the center of the giant elliptical galaxy M87. We have resolved the central compact radio source as an asymmetric bright emission ring with a diameter of 42 ± 3 μas, which is circular and encompasses a central depression in brightness with a flux ratio $\gtrsim 10:1$. The emission ring is recovered using different calibration and imaging schemes, with its diameter and width remaining stable over four different observations carried out in different days. Overall, the observed image is consistent with expectations for the shadow of a Kerr black hole as predicted by general relativity. The asymmetry in brightness in the ring can be explained in terms of relativistic beaming of the emission from a plasma rotating close to the speed of light around a black hole. We compare our images to an extensive library of ray-traced general-relativistic magnetohydrodynamic simulations of black holes and derive a central mass of $M = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_\odot$. Our radio-wave observations thus provide powerful evidence for the presence of supermassive black holes in centers of galaxies and as the central engines of active galactic nuclei. They also present a new tool to explore gravity in its most extreme limit and on a mass scale that was so far not accessible.

Key words: accretion, accretion disks – black hole physics – galaxies: active – galaxies: individual (M87) – galaxies: jets – gravitation

Vous noterez que dans le titre il n’est pas fait état de la première image d’un objet supermassif, mais de celle *d’un trou noir supermassif*.

Dans l’article trouverez la raison de ce choix : les auteurs n’ont trouvé aucune autre interprétation possible.

L’article est téléchargeable à :

http://www.jp-petit.org/papers/cosmo/2019-APJ-M87.pdf

The Astrophysical Journal Letters, 875:L1 (17pp), 2019 April 10 The EHT Collaboration et al.

maximum likelihood (RML; e.g., Narayan & Nityananda 1986; Wiaux et al. 2009; Thiébaut 2013). RML is a forward-modeling approach that searches for an image that is not only consistent with the observed data but also favors specified image properties (e.g., smoothness or compactness). As with CLEAN, RML methods typically iterate between imaging and self-calibration, although they can also be used to image directly on robust closure quantities immune to station-based calibration errors. RML methods have been extensively developed for the EHT (e.g., Honma et al. 2014; Bouman et al. 2016; Akiyama et al. 2017; Chael et al. 2018b; see also Paper IV).

Every imaging algorithm has a variety of free parameters that can significantly affect the final image. We adopted a two-stage imaging approach to control and evaluate biases in the reconstructions from our choices of these parameters. In the first stage, four teams worked independently to reconstruct the first EHT images of M87* using an early engineering data release. The teams worked without interaction to minimize shared bias, yet each produced an image with a similar prominent feature: a ring of diameter ~38–44 μas with enhanced brightness to the south (see Figure 4 in Paper IV).

In the second imaging stage, we developed three imaging pipelines, each using a different software package and associated methodology. Each pipeline surveyed a range of imaging parameters, producing between ~10^3 and 10^4 images from different parameter combinations. We determined a "Top-Set" of parameter combinations that both produced images of M87* that were consistent with the observed data and that reconstructed accurate images from synthetic data sets corresponding to four known geometric models (ring, crescent, filled disk, and asymmetric double source). For all pipelines, the Top-Set images showed an asymmetric ring with a diameter of ~40 μas, with differences arising primarily in the effective angular resolutions achieved by different methods.

For each pipeline, we determined the single combination of fiducial imaging parameters out of the Top-Set that performed best across all the synthetic data sets and for each associated imaging methodology (see Figure 11 in Paper IV). Because the angular resolutions of the reconstructed images vary among the pipelines, we blurred each image with a circular Gaussian to a common, conservative angular resolution of 20 μas. The top part of Figure 3 shows an image of M87* on April 11 obtained by averaging the three pipelines' blurred fiducial images. The image is dominated by a ring with an asymmetric azimuthal profile that

M87* April 11, 2017
50 μas
April 5
April 6
April 10
0 1 2 3 4 5 6
Brightness Temperature (10^9 K)

Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the three kernels (20 μas FWHM) is shown in the lower right. The image is shown in units of brightness temperature, $T_b = S\lambda^2/2k_B\Omega$, where S is the flux density, λ is the observing wavelength, k_B is the Boltzmann constant, and Ω is the solid angle of the resolution element. Bottom: similar images taken over different days showing the stability of the basic image structure and the equivalence among different days. North is up and east is to the left.

En 2021 ceci a été complété par une image en tout point similaire, présenté comme étant celle « du trou noir géant situé au centre de la voie lactée ».

Sans aucune prudence toute la communauté scientifique relayé par les médias, salue cette avancée majeure. Robbert Dijgraaf va même jusqu'à déclarer dans une vidéo :

- *Cette découverte est l'équivalent de celle de l'atome, un siècle plus tôt*

Revenons sur la genèse de cette chimère des temps modernes.

J.A.Wheeler est, certes un scientifique de poids. Mais il veut laisser son nom dans l'histoire, ayant été à l'origine d'une découverte importante. Il centre alors son intérêt sur l'article publié en 1939 par Robert Oppenheimer.

J'ai participé en 2017 au « Colloque annuel Schwarzschild », qui se tenait à Francfort sa ville natale. Bien qu'ayant publié en 2015 un article représentant une interprétation alternative de la solution extérieure de Schwarzschild :

Modern Physics Letters A
Vol. 30, No. 9 (2015) 1550051 (13 pages)

DOI: 10.1142/S0217732315500510

World Scientific
www.worldscientific.com

Cancellation of the central singularity of the Schwarzschild solution with natural mass inversion process

Jean-Pierre Petit* and G. D'Agostini†
National Center for Scientific Research, CNRS, France
**jppetit1937@yahoo.fr*
†dagostini.gilles@laposte.net

Received 4 December 2014
Accepted 6 January 2015
Published 27 February 2015

We reconsider the classical Schwarzschild solution in the context of a Janus cosmological model. We show that the central singularity can be eliminated through a simple coordinate change and that the subsequent transit from one fold to the other is accompanied by mass inversion. In such scenario matter swallowed by black holes could be ejected as invisible negative mass and dispersed in space.

Téléchargeable à :

http://www.jp-petit.org/papers/cosmo/2015-MPLA.pdf

où j'avais retrouvé, sans savoir qu'il l'avait fait un siècle avant moi, l'équation de la méridienne de la surface de Flamm :

is no longer zero. The metric is well defined for all values of ρ. If we embed the surface in a 3D-Euclidean space we can define the meridians, corresponding to

$$d\Sigma^2 = \frac{dr^2}{1 - \frac{R_s}{r}} + dz^2 . \quad (12)$$

And we immediately get the meridians as

$$z = \pm 2R_s\sqrt{\frac{r}{R_s} - 1} , \quad r^2 = R_s + \frac{z^2}{4R_s} . \quad (13)^*$$

The surface is a *space bridge*, a "2D diabolo" linking two 2D-Euclidean surfaces.

The problem of the signature has disappeared. From Lagrange equations we can calculate the geodesics in the $[\rho, \varphi]$ coordinate system. If embedded, the surface owns a throat circle whose perimeter is $2\pi R_s$. We can shape the surface as a twofold $F^{(+)}$ and $F^{(-)}$ cover of a M_2 manifold with a 1D common circular border, and create induced mapping between adjacent points $M^{(+)}$ and $M^{(-)}$.

Ainsi que la surface qui porte son nom, obtenue en opérant une rotation d'une parabole couchée autour d'un axe :

J.-P. Petit & G. D'Agostini

Fig. 2. The 2D diabolo embedded in R^3.

Dans cet article je présentais cette géométrie, de la même manière que l'avaient fait Einstein et Rosen en 1935, comme un pont reliant deux espace-temps à de Minkowski quatre dimensions.

Avec une différence. Grâce au changement de variable d'espace que j'avais mis en œuvre, à la différence de celui d'Einstein et de Rosen, la métrique-solution devenait Lorentzienne à l'infini, sur les deux nappes :

Cancellation of the central singularity of the Schwarzschild solution

Fig. 8. By crossing the throat sphere, the tetrahedron is inverted.

Now let us go back to (2) and apply (10). We get

$$ds^2 = \frac{\text{Log ch}\,\rho}{1 + \text{Log ch}\,\rho} c^2\, dt^2 - R_s^2 \left[\frac{(1 + \text{Log ch}\,\rho)}{\text{Log ch}\,\rho} \text{th}^2\, \rho\, d\rho^2 + (1 + \text{Log ch}\,\rho)^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2) \right]. \quad (16)$$

When ρ tends to $\pm\infty$, $\text{Log ch}\,\rho \to \rho$ and $\text{th}\,\rho \to 1$. The metric tends to Lorentz metric. Space is extended to $(\rho > 0;\ \rho < 0)$ domain. The hypersurface becomes a *spacetime bridge*, linking two Lorentz spaces through a throat surface S2. When we calculate the geodesics in the plane $\theta = \frac{\pi}{2}$ in the $\{t, r, \theta, \varphi\}$ representation we find the following (Eq. (6.90) in Ref. 8):

Au-delà de cela je montrais que le passage mettait en communication deux espace-temps PT-symétriques, c'est-à-dire où les coordonnées d'espace et de temps se trouvaient inversées.

Mais je n'avais obtenu que la possibilité d'afficher un poster à l'entrée de la salle, mon article n'ayant pas été jugé d'un niveau suffisant pour faire l'objet d'un exposé devant les participants. Mais le thème de cette conférence était « la physique des trous noirs ».

Le conférencier-vedette était bien entendu Juan Maldacena, qui présenta sur l'écran la solution de Schwarzschild, avec sa lettre r au lieu de R, en déclarant :

- *Quand en 1916 Karl Schwarzschild présenta cette solution de l'équation d'Einstein, la communauté scientifique eut du mal à comprendre ce qu'elle représentait. Mais après des années ces choses sont maintenant bien maîtrisées et comprises.*

2017 : Le colloque Schwarzschild, à Francfort Allemagne.

Pas un mot sur la seconde solution, sur ce second article publié par Schwarzschild en février 1916, avant sa mort. Je pense que Maldacena en ignore probablement jusqu'à l'existence.

J'ai décrit ma participation à ce colloque dans ma vidéo Janus 22/1 :

https://youtu.be/FMtfbUX5q4E

- *Y a-t-il un géomètre dans la salle ?*

Vous voyez donc ce qui s'est passé. Après la seconde guerre mondiale des scientifiques ont porté leur intérêt sur les travaux de Karl Schwarzschild, en se basant sur la façon dont Richard Tolman les avait présentés dans son livre, paru en langue anglaise, en 1934. où la contrainte :

$r > R_s$

disparaissait complètement.

Des gens comme J.A.Wheeler aux Etats-Unis et Roger Penrose en Angleterre cherchèrent donc comment interpréter cette étrange et déconcertante géométrie. Comment, par exemple, réussir à pénétrer à l'intérieure de cette « sphère de Schwarzschild », rebaptisée par Oppenheimer « horizon des évènements ».

En 1960 Wheeler dîne dans un restaurant de Princeton avec un jeune chercheur, Martin Kruskal, qui lui décrit sa façon de procéder.

Martin Kruskal 1925 - 2006

Celui-ci explique à Wheeler, sur la nappe en papier du restaurant, sa façon de procéder. Enthousiaste, Wheeler appuie aussitôt la publication d'un article, qui paraît aussitôt dans Physical Review :

PHYSICAL REVIEW VOLUME 119, NUMBER 5 SEPTEMBER 1, 1960

Maximal Extension of Schwarzschild Metric*

M. D. KRUSKAL†
Project Matterhorn, Princeton University, Princeton, New Jersey
(Received December 21, 1959)

There is presented a particularly simple transformation of the Schwarzschild metric into new coordinates, whereby the "spherical singularity" is removed and the maximal singularity-free extension is clearly exhibited.

THE well-known Schwarzschild expression[1] for the metric around a center of mass $m(g)$ or $m^* = (Gm/c^2)$(cm) is

$$ds^2 = -(1-2m^*/r)dT^2 + (1-2m^*/r)^{-1}dr^2 + r^2 d\omega^2, \quad (1)$$

with

$$d\omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta \, d\varphi^2. \quad (2)$$

Kasner, Lemaître, Einstein and Rosen, Robertson, Synge, Ehlers, Finkelstein, and Fronsdal have shown[2] that the singularities at $r=0$ and $r=2m^*$ are very different in character (Table I). Their conclusion—that

The extended space, $\mathcal{S}$, moreover, is the ***maximum*** singularity-free extension of $\mathcal{L}$ that is at all possible, for the following reason: As may be seen by direct examination of the geodesics (perhaps most simply carried out mainly in the familiar r,T coordinates, with special attention to geodesics on which $r=2m^*$ either isolatedly or everywhere), every geodesic, followed in whichever direction, either runs into the "barrier" of intrinsic singularities at $r=0$ ($v^2-u^2=1$), or is continuable infinitely with respect to its "natural length." (This is measured in terms of the number of parallel transfers of an infinitesimal tangent vector, is determined only

Téléchargeable à :

http://www.jp-petit.org/papers/cosmo/1960-Kruskal.pdf

Le lecteur ne trouvera aucun détail de calcul dans cet article. Comme on le découvre dans la figure qui l'accompagne, Kruskal présente un schéma de ce que Wheeler appelle déjà un « wormhole », un « trou de ver ».

FIG. 1. Two interpretations of the 3-dimensional "maximally extended Schwarzschild metric" at the time $T=0$. Above: A connection or bridge in the sense of Einstein and Rosen between *two* otherwise Euclidean spaces. Below: A wormhole in the sense of Wheeler connecting two regions in *one* Euclidean space, in the limiting case where these regions are extremely far apart compared to the dimensions of the throat of the wormhole.

Mais il présente ce qu'on désignera par la suite comme le « diagramme de Kruskal » :

Le diagramme de Kruskal.

La partie soulignée par Kruskal représente la première nappe du Wormhole. Associons-là à la couleur bleue. Si on relie les deux figures, ce secteur représente alors la seconde nappe, représentée par la couleur jaune orangée :

En recollant avec le dessin du wormhole présenté par Kruskal, sur le diagramme en coordonnées (u,v) cela reviendrait à replier la figure selon :

Ce qui aurait pour effet de faire disparaître les secteurs laissés blancs en tant qu'artefacts topologiques. Il y a toujours maintes façons de représenter des objets géométriques. En projetant un tore sur un plan on fait apparaître des projections qui … n'existent pas :

Le seul critère, vis-à-vis de ces diverses représentations est de garder en tête le signe de l'éléments de longueur ds^2 . S'il est négatif, la longueur dans ces portions de la surface devient imaginaire pure. On quitte alors une géométrie fondée sur des réels pour passer à une géométrie complexe. C'est en perdant de vue ce critère que nos modernes physiciens théoriciens ne se sont pas rendu compte qu'ils situaient de facto leur cosmologie dans le monde des complexes, alors que le point de départ était de considérer que les coordonnées et la longueur s appartenaient au monde des nombres réels.

Quel sens donner aux parties blanches du plan ?

Signification de cette figure : C'est très exactement ce qui se produit quand on passe de la représentation métrique du tore :

$$ds^2 = \frac{dr^2}{-r^2 + 2\,r R_a + r_g^{\,2} - R_a^{\,2}} + r^2 d\varphi^2$$

à celle-ci :

$$ds^2 = r_g^{\,2}\, d\theta^2 + (R_a + r_g \cos\theta)^2 d\varphi^2$$

à l'aide du changement de variable :

$$r = R_a + r_g \cos\theta$$

Alors que la première représentation laissait le ds^2 positif pour toutes les valeurs de θ et de φ , la seconde a fait apparaître des sortes de fantômes géométriques, correspondant à des valeurs de la nouvelle coordonnée r pour laquelle $ds^2 < 0$.

Ce qui est expliqué dans le détail dans la vidéo **Janus 22-4** à partir de 28 minutes. Elle est sous-titrée en anglais. Voir :

https://youtu.be/glepnXSkiyE

Là, on en revient à la question : qui a soudain introduit un changement de signes dans l'expression des solutions mathématiques de l'équation d'Einstein, en proposant de passer de

$$ds^2 = -\frac{dr^2}{1 - 2m/r} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2\theta\, d\phi^2 + \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2$$

à ceci :

$$ds^2 = +\frac{dr^2}{1 - 2m/r} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta\, d\phi^2 - \left(1 - \frac{2m}{r}\right) dt^2$$

Je n'ai trouvé nulle part, dans la littérature, d'article où on explique la raison de ce changement de signe, opéré, dans l'après-guerre.

Or, considérons des trajectoires à r ,θ et φ constants. Pour r>2m(donc, à l'extérieur de la « sphère de Schwarzschild » ds^2 est négatif. Pour déboucher sur un temps propre <u>réel</u> il est alors nécessaire de le définir selon :

$$\tau = \int \sqrt{\left(1 - \frac{2m}{r}\right)}\, dt = \int \sqrt{-g_{tt}}\, dt$$

On voit ainsi apparaître le temps propre, tel que Hilbert l'a défini dans son article de 1916. Pour retomber sur un temps propre réel il est obligé d'introduire un signe moins devant la quantité sous radical.

quand $G\left(\frac{dx_s}{dp}\right) < 0$

ausfällt, heiße eine *Zeitlinie* und das längs dieses Kurvenstückes
le long de cette portion de courbe
genommene Integral
l'intégrale

$$\tau = \int \sqrt{-G\left(\frac{dx_s}{dp}\right)}\, dp$$

heiße die *Eigenzeit der Zeitlinie*;
est le temps propre de cette ligne de temps

Le responsable de ce changement des signes, c'est donc Hilbert. Mais alors, pourquoi avait-il opté pour une forme bilinéaire avec ces signes-là, puisque, pour retomber sur un temps propre positif, donc sur une longueur positive, il lui était alors nécessaire de la définir en introduisant ce changement de signe !

Il me semble que l'explication réside dans la conception de Hilbert de l'espace-temps, associée à une interprétation quasi biblique de la Genèse.

Pour Hilbert, ce qui est premier, c'est l'espace.

Avant que n'apparaisse la relativité générale, l'espace était exempt de courbure. Mais même avec l'effet de courbure, traduit par cette très légère altération des trajectoires képlériennes, cet espace est quasi euclidien. On pourrait donc écrire :

- Dieu crée donc cet espace quasi-euclidien[50].

- Il installe ensuite les masses dans cet espace (les astres)

---

[50] « elliptique », décrit par des coordonnées (x , y , z , l)

- Puis il définit les lois auxquelles ces astres devront se conformer (l'équation de champ [51])

- A ce stade les quatre coordonnées de ce « monde de Hilbert » sont :

$$(x , y , z , l)$$

→ Dans sa forme bilinéaire il n'y a que des signes « plus » [52] . L'équation de champ qu'il publie en 1915, et qui avait mis Einstein dans tous ses états, reste écrite avec ces coordonnées.

- Alors seulement Dieu donne le top départ. Alors cette coordonnée l se transforme en it . Pour Hilbert, le temps est *imaginaire pur*. Le fait que sa géométrie devienne hyperbolique traduit simplement l'idée d'intégrer les aspects relativistes dégagés par Einstein.

Quand il traite la question de la solution construite par Schwarzschild, il la formule dans des dimensions &(x , y , z , l). C'est sur la base de ce choix de variables qu'il effectue tous les calculs. A aucun moment le temps t , n'apparaît. Cet univers se situe « avant que le temps n'apparaisse », « avant qu'il ne se manifeste », en quelque sorte.

Dans leurs projections en &(x , y , z) les trajectoires des planètes sont déjà tracées.

Et c'est seulement au tout dernier moment que Hilbert se décide à convertir sa variable en it, en faisant apparaître le temps :

keine wesentliche Einschränkung bedeutet, so ergibt sich aus (43) für $l = it$ die gesuchte Maßbestimmung in der von Schwarzschild zuerst gefundenen Gestalt

$$(45)\quad G(dr, d\vartheta, d\varphi, dl) = \frac{r}{r-\alpha}dr^2 + r^2 d\vartheta^2 + r^2 \sin^2\vartheta\, d\varphi^2 - \frac{r-\alpha}{r}dt^2.$$

$l = it$

Traduction :

Il faut voir là l'origine de cette signature : (+ + + -)

[51] Celle-ci est présentée dans le papier de 1915 où le temps n'apparaît pas. Le mot n'y est pas formulé. L'espace quadridimensionnel de Hilbert se décrit à l'aide de coordonnées w_1 , w_2 , w_3 , w_4 et c'est à l'aide de celles-ci que sont exprimées toutes les dérivées, premières et seconde, ainsi, implicitement, que l'équation de champ.

[52] Sa géométrie, avec ses variables (x , y , z , l) est « elliptique ».

... alors pour $l = i\,t$, (43) aboutit à la métrique désirée sous la forme trouvée pour la première fois par Schwarzschild

$$G(dr, d\theta, d\varphi, dl) = \frac{r}{r-\alpha} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sin^2\theta\, d\varphi^2 - \frac{r-\alpha}{r} dt^2 \qquad (45)$$

En fait, Hilbert devrait faire intervenir deux étapes

Emergeant de ses calculs : sa solution géométrique, avec la signature (+ , + , + , +)

$$G(dr, d\theta, d\varphi, dl) = \frac{r}{r-\alpha} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sin^2\theta\, d\varphi^2 + \frac{r-\alpha}{r} dl^2 \qquad (45)$$

et c'est seulement à ce moment-là qu'il fait jouer : $l = i\,t$

Alors sa solution s'exprime avec une signature : (+ , + , + , −)

$$G(dr, d\theta, d\varphi, dt) = \frac{r}{r-\alpha} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 sin^2\theta\, d\varphi^2 - \frac{r-\alpha}{r} dt^2 \qquad (45\,bis)$$

Je suis désolé de cette incursion dans le monde des mathématiques, mais je ne savais pas où caser cette analyse, qui est extrêmement importante. A moins qu'un théoricien ne puisse me montrer un article datant de l'après-guerre où quelqu'un justifie ce changement des signes (des signes composant la « signature ») je ne vois pas d'autre raison que le fait que quelqu'un se soit dit, à un moment ,« *Hilbert fait comme ça. Il doit avoir ses raisons : on va faire pareil* »

La conséquence est qu'on a alors perdu la trame de cette géométrie moderne où le fil conducteur consiste justement à conserver un ds^2 positif, c'est-à-dire de rester dans le monde réel.

Avec Kruskal et Wheeler la cosmologie bascule dans une forme de

Surréalisme scientifique.

Le diagramme de Kruskal en est une parfaite illustration. Les deux secteurs figurés en rose et en vert représentent alors « l'intérieur du trou noir », où le temps propre devient imaginaire pur, mais ni Kruskal, ni Wheeler, ni leurs successeurs ne s'en soucient.

Ce trou noir possède alors un « centre ». Est-ce un point ? Dans ce diagramme de Kruskal, les points peuvent se transformer … en courbes. Ce « centre » se mue donc en deux hyperboles le long desquelles « la courbure est infinie ».

Il reste deux régions qui n'ont pas été définies, laissées ici en blanc. Adoptons la couleur violette :

Comme les hyperboles sont l'image « du point se situant au centre de l'objet », les région violettes représentent alors « l'intérieur de ce point ».

Dans ce métamonde Kruskalien les points sont dotés d'un intérieur !

Il reste un point qui pose problème à nos géomètres de l'extrême. Si on opte pour ces coordonnées :

$$ds^2 = + \frac{dr^2}{1-2m/r} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\phi^2 - \left(1-\frac{2m}{r}\right)dt^2$$

On peut se concentrer sur des trajectoires radiales. Alors :

$$ds^2 = + \frac{dr^2}{1-2m/r} - \left(1-\frac{2m}{r}\right)dt^2$$

Un constant immédiat : quand on franchit la sphère de Schwarzschild, le signe des deux termes s'inversent.

Mais, dans le trou noir, tout est possible, tout est permis. Ses nouveaux spécialistes fournissent aussitôt l'explication : A l'intérieur du trou noir, les variables échangent leurs rôles respectifs : R devient la variable de temps et t une variable d'espace.

Citons ce qui est écrit dans le traité d'Adler Schiffer et Bazin, page 223 :

The Schwarzschild Solution and Its Consequences **223**

When r becomes less than $2m$, the signs of the metric components g_{00} and g_{11} change, g_{11} becoming positive and g_{00} becoming negative. This forces us to reconsider the physical meaning of t and r as time and radial markers inside the Schwarzschild radius. Indeed a world-line along the t axis (r, θ, φ constant) has $ds^2 < 0$ and is a *spacelike* curve, while a world-line along the r axis has $ds^2 > 0$ and is a *timelike* curve. It would thus appear natural to reinterpret r as a time marker and t as a radial marker for events which occur inside the Schwarzschild radius. Since we inter-

Traduction française :

> Quand r devient inférieur à 2m, les signes des composants g_{11} et g_{oo} de la métrique changent, g_{11} devenant positif, et g_{oo} négatif. Ceci nous oblige à reconsidérer la signification physique de t et de r en tant que marqueurs de temps et de rayon, à l'intérieur de la sphère de Schwarzschild. Ainsi une ligne d'univers le long de l'axe du temps t (r , θ , φ constants) est alors associée à une valeur négative de ds2 et est

alors une ligne du genre espace. Tandis qu'un ligne se déployant selon l'axe r devient une ligne du genre temps. Il semble donc naturel de réinterpréter r comme un marqueur de temps et t comme un marqueur d'espace, pour les évènements se déroulant à l'intérieur de la sphère de Schwarzschild.

Comprenne qui pourra.

On se rappelle que Tolman et Oppenheimer avait posé :

$$g_{oo} = g_{tt} = e^{\nu(r)} \quad g_{11} = g_{rr} = e^{\lambda}$$

En gardant en tête que les exponentielles de variable réelle sont strictement positives, ce qui était une façon d'imposer la constance de la signature, des signes des termes dans la métrique.

Page 187 de l'ouvrage qui nous sert de référence (mais on trouvera la même chose dans tous les livres) on lit :

$$(69)\ ds^2 = e^{\nu(r)}c^2\, dt^2 - e^{\lambda(r)}dr^2 - r^2\,(\,d\theta^2 + \sin^2\theta\, d\varphi^2\,)$$

Mais, quelques pages plus loin, tous calculs faits :

$$(6.47)\qquad \begin{aligned} e^{\nu} &= e^{-\lambda} = 1 - \frac{2m}{r} \\ e^{\lambda} &= \frac{1}{1 - 2m/r} \end{aligned}$$

Quand r devient inférieur à 2m ces exponentielles deviennent … négatives.

En 1963 un Néo-Zélandais, Roy Kerr, parvient à construire une solution stationnaire de l'équation de champ, non plus à symétrie sphérique, mais axisymétrique. La communauté des spécialistes s'empresse d'identifier avec enthousiasme cette solution à un « trou noir en rotation ».

Cette solution possède un « terme croisé » en dt dφ où se mêlent deux variables : le temps t et l'angle φ repérant la position des points selon un mouvement de rotation par rapport à l'axe de symétrie.

$$ds^2 = \left(1 - \frac{R_s \rho}{\rho^2 + a^2 \cos^2\theta}\right) c^2 dt^2 - \frac{\rho^2 + a^2\cos^2\theta}{\rho^2 + a^2 - R_s\rho} d\rho^2 - \left(\rho^2 + a^2\cos^2\theta\right) d\theta^2$$
$$- \left[\left(\rho^2 + a^2\right)\sin^2\theta + \frac{R_s \rho a^2 \sin^4\theta}{\rho^2 + a^2\cos^2\theta}\right] d\varphi^2 - \frac{2R_s \rho a \sin^2\theta}{\rho^2 + a^2\cos^2\theta} c dt d\varphi$$

Cette particularité implique le fait que la vitesse de la lumière, mesurée selon une direction azimutale possède deux valeurs différentes, selon que le rayon lumineux accompagne le mouvement de rotation où se trouve émis dans la direction opposée.

L'interprétation est alors la suivante [53] .

- *Loosely speaking, we may think of the rotating source as "dragging" space around with it, in a Machian sense the source "competes"with the Lorentzian boundary conditions at infinity in the establishment of a local inertial frame.*

Traduction :

- On peut interpréter ce phénomène en considérant une source en rotation qu, en quelque sorte, « entraîne » l'espace avec elle. En s'inspirant de l'idée d'Ernst Mach cette source s'oppose aux conditions Lorentzienne à l'infini en tentant d'établir son propre système inertiel local.

Nous verrons par la suite que cette idée est e fait très profonde, et mérite développement.

[53] Ouvrage d'Adler, Schiffer et Bazin, page 258. Téléchargeable à : http://www.jp-petit.org/books/asb.pdf

La chimère est née.

A une époque où s'est opéré un divorce entre modélisations et observations, du fait de l'impossibilité de la moindre comparaison avec ces dernières, dans ce domaine, totalement absentes, tout devient permis, tout devient envisageable.

La théorie se conjugue dès lors au conditionnel.

Le mathématicien Roger Penrose [54] construit des théorèmes se référant à « la singularité centrale des trous noirs ».

Roger Penrose, prix Nobel 2020

D'autre étudient leur stabilité. Steven Hawking montre que « les trous noirs n'ont pas de cheveux ». En d'autres termes leur sphère horizon doit être régulière.

[54] Bénéficiaire du Prix Nobel 2020 "pour avoir démontrée que les trous noirs étaient une conséquence inéluctable de la relativité générale ».

On envisage même, dans le cas du « trou noir de Kerr » une méthode qui permettrait d'en extraire de l'énergie.

Hawking construit un rayonnement qui portera son nom. Dans cette optique, le vide étant un grouillement de matière et d'antimatière, il imagine que le trou noir puisse capturer l'un des éléments du couple, permettant à l'autre de s'échapper. Ainsi les trous noirs « s'évaporeraient ». Mais le phénomène, pour des supposés trous noirs qui auraient des masses de l'ordre de quelques masses solaires, durerait 10^{50} ans. Autant dire qu'il est inobservable.

Enfin apparaît une thermodynamique des trous noirs. En effet, si ces objets captent des ensembles de masses dotées de structures complexes, que devient l'information ? La résolution d'un tel paradoxe mobilise alors des armées de chercheurs. Des prix sont attribués à ceux qui réalisent des avancées dans ce domaine.

Si, durant les cinquante dernières années les modèles théoriques n'ont fait aucun progrès, tout a été par contre mis en œuvre pour tester ceux qui avaient émergé pendant les décennies précédentes. Dans cet éventail se situe ce qui a pu être fait vis-à-vis de l'existence d'ondes gravitationnelles.1 Cette théorie prévoyait que deux corps, orbitant autour d'u centre de gravité commun, devait émettre ces ondes, ce qui traduisait une perte d'énergie. Celle-ci devait alors faire se rapprocher les deux astres, tout en réduisant leur période d'orbitation.

En 1974 Hulse et Taylor découvrent un pulsar double, c'est-à-dire un ensemble de deux étoiles à neutrons, de masses voisines (1.44 et 1.38 masse solaire) orbitant autour d'un centre de gravité commun en 7 heures. Le suivi de ce temps d'orbitation permet de mettre en évidence une diminution de 35 secondes en 28 années, avec un excellent accord vis-à-vis des prédictions théoriques.

Décroissance de la période d'orbitation en fonction du temps.

Ce résultat représente donc une confirmation de l'existence des ondes gravitationnelles. Dans la mesure où cette perte d'énergie par rayonnement rapproche les deux astres, on peut en conclure qu'à terme ce processus amènera leur fusion, s'accompagnant d'une fantastique émission de ces ondes. Des chercheurs ont alors l'idée folle de créer un dispositif qui serait susceptible de détecter de tels signaux. Et c'est le début des projets LIGO et VIRGO.

Les ondes gravitationnelles se traduisent par des variation conjointes des longueurs, dans la direction selon laquelle elles de propagent, et dans une direction perpendiculaire à celle-ci. En installant deux bras de plusieurs kilomètres de long, sortes de tunnel où on aura fait le vide, on peut alors envisager de mettre le phénomène en évidence par interférométrie laser.

C'est un pari fantastique, dans la mesure où cette variation de longueur correspond à une fraction du diamètre d'un atome. Des décennies de travail sont consacrées à la réduction du niveau de bruit. Aux Etats-Unis, deux installations, situées à deux extrémités nord-ouest et sud-est du pays, les plus distantes possibles constituent le système LIGO.

Une des deux installations américaines LIGO [55] .

Les deux installations sont susceptibles d'enregistrer un signal, perturbé par le bruit de fond. Ce bruit n'est pas le même pour des deux installations. Au départ on espérait donc pouvoir dégager ce signal en conjuguant les deux enregistrements, pour éliminer le bruit. Au final les théoriciens créent, à l'aide de leur modèle, un éventail d'une centaine de milliers de signaux, associés à autant de configurations possibles des deux masses qui fusionnent. Dans l'éventail des configurations retenues figurent des couples d'étoiles à neutrons et bien entendu des couples de trous noirs. Le théoricien qui se trouve au cœur de cet effort d'interprétation est Kip Thorne, élève de J.A.Wheeler.

J.A.Wheeler 1911 - 2008
Kip Thorne 1940 -
C.Misner 1932 -

[55] LIGO : Laser Interferometry fGravitational (waves) Observatory

Thorne est coauteur avec Wheeler et Misner de ce que la communauté considère comme la bible en la matière, leur célèbre ouvrage Gravitation

Le signal enregistré par les deux installations LIGO le 14 septembre 2015 est immédiatement visible sur les deux enregistrements.

Signals plus noise

Signals

noise

Signaux enregistrés par les deux installations LIGO le 14 septembre 2015.

C’est un immense succès, couronnant des décennies d’efforts techniques de deux personnages, à qui le prix Nobel 2017 est attribué deux ans plus tard: les deux concepteurs de ce projet, Rainer Weiss et Bary Barish. .

R.Weiss et B.Barish prix Nobel 2017

Mais quelle est la source de ce signal ? On se tourne alors vers Kip Thorne qui est l’auteur d’une programme intitulé relativité numérique », ou ces fusions sont modélisées. Ce programme fournit alors l’estimation des deux masses impliquées, en sélectionnant le signal le plus proche de l’enregistrement disponible.

Il est alors essentiel de garder en tête que ce décodage dépend totalement du modèle considéré.

Vues les valeurs estimées de masses il ne s’agit alors pas d’une fusion d’étoiles à neutrons, mais de ce qui est interprété comme une fusion de deux trous noirs, ayant des masses, respectivement, de **36** et **29** masses solaires, situés à une distance de 1.3 milliards d’années-lumière. Thorne indique que ces estimations de masses, obtenues à l’aide de son programme, sont données à plus ou moins **4** masses solaires près. Les spécialistes considèrent unanimement que cette observation apporte la preuve de l’existence des trous noirs.

Cette première détection d’un signal gravitationnel est rapidement suivie par d’autres et les astronomes qui sont ainsi dotés d’un nouvel instrument d’observation, estime que celui-ci enregistre un évènement toutes les quinze minutes.

Kip Thorne se voit associé aux prix Nobel 2017.

Ci-après quelques résultats, en date de septembre 2020.

En ordonnée le logarithme des masses des objets.

Le record des masses est détenu par l'évènement GW190 521, situé à 7 milliards d'années-lumière, où le programme de relativité numérique de Kip Thorne évalue les masses des objets qui fusionnent à 66 et 85 masses solaires. L'objet résiduel a alors une masse de 142 masses solaires (plus ou moins 18). D'où une différence de masse de 8 masses solaires, converties en énergie dissipée par ondes gravitationnelles.

La question qui émerge alors est :

- Si ce sont des trous noirs, comment se sont-ils formés ?

Pour information en 2018 la jeune étoile R136a1 (âgée de 300.000 ans) a été détectée en 2018, à 160.000 années-lumière de la Terre, sa masse étant estimée entre 170 et 230 masses solaires

Chapitre 7 :

Introduction de masses négatives dans le modèle cosmologique.

Les solutions alternatives qui vont être présentées dans ce qui va suivre impliquent m'introduction de masses négatives dans le modèle cosmologique. L'idée progresse lentement, avec difficulté car, pour s'imposer, elle nécessite un saut paradigmatique majeur.

Historiquement, le premier à avoir tenté de le faire, en 1957, est le cosmologistes Hermann Bondi.

Hermann Bondi
1919 - 2005

Voici son article :

REVIEWS OF MODERN PHYSICS VOLUME 29, NUMBER 3 JULY, 1957

Negative Mass in General Relativity

H. BONDI

King's College, University of London, London, England

1.

ALTHOUGH some of the arguments relating to negative mass are fairly elementary and well known, it will nevertheless be of advantage to rediscuss the meaning of this term. In the first instance, without fully specifying a theory, we can distinguish between three kinds of mass according to the measurement by which it is defined: inertial, passive gravitational, and active gravitational mass. Inertial mass is the quantity that enters (and is defined by) Newton's second law*; passive gravitational mass is the mass on which the gravitational fields acts, that is it is defined by $\mathbf{F} = -m \operatorname{grad} V$; active gravitational mass is the mass that is the source of gravitational fields and is hence the mass that enters Poisson's equation and Gauss' law.

In Newtonian physics the law of action and reaction implies the equality of active and passive gravitational masses, but the equality of inertial mass with these other two is a separate empirical fact. The sign of both these masses can take either value and it is an additional empirical result that it is always positive. Four cases accordingly arise, if this empirical fact is left out of account.

(i) All mass is positive; this is familiar.

(ii) Inertial mass negative, gravitational mass is positive. A body consisting of matter of this kind will respond perversely to all forces whether gravitational or of other kinds, but will produce gravitational forces just as a usual body does.

(iii) Inertial mass positive, gravitational masses negative. In this case we would have normal behavior relating to all nongravitational forces, but gravitational behavior involving masses of this type and of type (i) would be governed by a negative Coulomb law; i.e., like masses would attract and unlike masses would repel.

(iv) All mass is negative. This would be a combination of (ii) and (iii). Matter of this kind responds perversely to nongravitational forces, responds like ordinary matter to gravitational forces, but produces repulsive gravitational fields.

In general relativity the situation is quite different. The principle of equivalence is not a separate fact but is basic to the theory. Accordingly the ratio of inertial and passive gravitational masses is the same for all bodies. The relation between active and passive gravitational masses is not fixed by anything like Newton's third law as this would require integrals over

* A mass-independent force (say, of electromagnetic nature) has to be used here, for obvious reasons.

Téléchargeable à :

http://www.jp-petit/org/papers/cosmo/1957-Bondi.pdf

Cet article n’a qu’un intérêt historique, en compliquant inutilement les choses. C’est à dire en introduisant plusieurs types de masses : gravitationnelle, inertielle. Dans la mesure où on se propose de répondre à la question : « que se passe-t-il quand on tente d’introduire des masses négatives dans la relativité générale ? l’équation qui la résume apporte toutes les réponses.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} = \chi T_{\mu\nu}$$

Le second membre représente la source du champ gravitationnel. Cette équation peut être écrite sous différentes formes, et ceci se trouvera expliqué dans des annexes. Sous sa forme «mixte » elle s’écrit alors comme ceci :

$$R_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu}^{\nu} = \chi T_{\mu}^{\nu}$$

Peu importe ce que ces termes signifient. Son intérêt est qu’alors apparaissent, dans le second membre, des grandeurs qui nous sont familières :

$$T_{\mu}^{\nu} = \begin{pmatrix} \rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{p}{c^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{p}{c^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{p}{c^2} \end{pmatrix}$$

On reconnaît, en haut et à gauche, la masse volumique ρ en kilos par mètre cube et dans la diagonale la pression p, divisée par le carré de la vitesse de la lumière c.

Je pourrai tout aussi bien écrire :

$$T_{\mu}^{\nu} = \frac{1}{c^2} \begin{pmatrix} \rho c^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -p \end{pmatrix}$$

Dans ce tableau se trouvent « les sources du champ gravitationnel ». ρc^2 représente alors de Joules par mètre cube. Et il en est de même pour la pression p que nous avions l'habitude de considérer en tant que force par unité de surface, mais qui est aussi une densité d'énergie. On découvre donc, dans ce tableau :

Ce qui courbe l'espace c'est l'énergie.

Si nous imaginons que l'univers est un gaz fait de particules de masse m, animées d'une vitesse d'agitation v , alors la pression s'écrit :

$$p = \frac{\rho v^2}{3}$$

La pression, dans un gaz.

Et là, on comprend que la pression est la mesure d'une densité volumique d'énergie cinétique d'agitation thermique des particules. Et on perçoit du même coup que quand cette vitesse d'agitation thermique moyenne v est faible devant la vitesse de la lumière cette contribution à la densité d'énergie devient négligeable. Alors il ne reste plus que le terme en haut et à gauche. Ces conditions correspondent à ce qu'on appelle l'approximation newtonienne.

Par rapport à ce qui nous occupe nous dirons que la géométrie de l'espace-temps est alors déterminée par cette unique grandeur ρ, par la masse.

Qu'est-ce que nous donne la relativité générale, c'est-à-dire que nous donne cette équation de champ d'Einstein ?

Elle produit des trajectoires[56] de particules témoin dont le dessin ne dépend que de la distribution des masses. Ainsi, si nous envisageons le champ gravitationnel créé par une sphère emplie d'une masse de densité ρ, positive, ces trajectoires auront l'allure ci-après :

Trajectoires de particules-témoin dans le champ gravitationnel créé par une masse positive.

[56] Qu'on appelle géodésiques.

Que sont ces « particules-témoins » ? L'équation d'Einstein ne le précise pas. Ce qui signifie que quelle que soit la nature de cette particule témoin qui se trouve soumise au champ gravitationnel créé par cette masse positive, en rouge, elle adoptera ce type de comportement, imposé par l'équation de champ ? Cette particule pourra aussi bien être une masse-témoin positive qu'un masse-témoin négative. D'où ces premières lois d'interaction :

- Les masses positives attirent les masses positives (selon la loi de Newton)

- Les masses positives attirent les masses négatives (selon la même loi de Newton, composée avec la valeur absolue de la masse négative)

→ Introduisons maintenant dans le second membre de l'équation d'Einstein une masse volumique négative, un contenu en masse négative. L'équation génère alors ce type de trajectoires :

Trajectoires de particules-témoin dans le champ gravitationnel créé par une masse négative.

On en déduit que :

- Les masses négatives repoussent les masses négatives (selon la loi de Newton en mettant le bon signe).

- Les masses négatives repoussent les masses positives (selon la loi de Newton en mettant le bon signe).

On peut résumer cela avec ce dessin :

RUNAWAY EFFECT

Quand des masses de signes opposés sont mises en présence, la masse positive s’enfuit, poursuivie par la masse négative. Les deux sont soumises à la même force accélératrice. →Elles acquièrent une vitesse de plus en plus grande, alors qu’il n’y a aucun apport d’énergie. En effet la masse négative a une énergie cinétique négative.

$$m_{(2)} = -m < 0 \qquad \overrightarrow{V_{(2)}} \qquad \overrightarrow{V_{(1)}} \qquad m_{(1)} = +m > 0$$

$$\frac{1}{2} m_{(1)} V_{(1)}^2 + \frac{1}{2} m_{(2)} V_{(2)}^2 = Cst$$

On a donné à ce phénomène le nom *runaway*[57].

On remarque autre chose. Quand on considère que l’univers ne contient que des masses positives, les forces qui agissent correspondent à deux principes fondamentaux.

- Le principe d’action-réaction.
- Le principe d’équivalence.

---

[57] « Runaway », en anglais : « courir au loin ».

La signification de ce second principe :

- La masse qui crée le champ gravitationnel ; dite masse gravifique, est égale à la masse qui est utilisée pour calculer l'accélération subie par la masse qui subit ce champ, dite masse inertielle.

Dans la loi de Newton :

masse x accélération = force.

Il est clair que quand on ajoute des masses négatives dans le modèle classique, dans l'univers d'Einstein, régi par son équation de champ, ces deux principes sont violés.

La conclusion de la communauté scientifique a alors été :

Il est impossible d'introduire des masses négatives dans l'univers.

Dans la relativité générale le comportement des masses, leurs trajectoires géodésiques, dérive de la géométrie qui découlent du second membre, qui contient tout ce qui détermine cette géométrie. C'est-à-dire ces deux formes d'énergie qui correspond à l'énergie mc^2 et à l'énergie cinétique (1/2) mv^2 des particules. .

Cette solution géométrique est représentée par les valeurs en tous points de cet objet désigné par la lettre R, dans le premier membre de l'équation[58].

Cet objet mathématique (dont on ne parlera que dans les annexes destinées spécifiquement aux niveaux mathématiques spéciales) dépend lui mêle d'un autre objet, qu'on appelle métrique » (line element en anglais). La forme de celui-ci est déterminée par les symétries choisies.

En fait, on ne sait produire, en relativité générale, que deux types de solutions.

→ Soit on considère que l'univers est homogène et uniforme. On s'efforce alors de déterminer comment il évolue, selon la seule variable temps.

→Soit il est stationnaire, indépendant du temps[59]. On ne sait alors construire que deux solutions particulières :

→ On se situe en un point particulier. La géométrie est alors supposée être invariante par des rotations effectuées autour de ce point. Cela correspond alors à une symétrie sphérique.

---

[58] Avec ses deux indices, c'est le « tenseur de Ricci ».
[59] Qu'on pourra également qualifier de « solution invariante par translation temporelle ».

→ On se situe en un point particulier. La géométrie est alors supposée être invariante par une rotation effectuée autour d'un axe de symétrie. Cela correspond alors à une symétrie axisymétrique ».

Nous allons résumer le schéma de construction de la solution à travers ce diagramme :

Hypothèses concernant a source du champ (second membre)

↓

Hypothèses (symétries de la solution)

↓

Forme de l'objet mathématique « métrique g »

↓

Forme de l'objet mathématique R

↓

Introduction dans l'équation de champ.

↓

Calcul des composantes de l'objet métrique g

↓

Calcul des trajectoires (géodésiques)

Le modèle fournit alors deux types de géodésiques. Il y a celles qui se réfèrent aux mouvements des particules matérielles, des masses. Et il t a celles qui décrivent les mouvements des photons. Elles sont de natures différentes.

Profitons de ce moment pour souligner un point important.

La relativité générale ignore totalement l'existence de particules, quelles qu'elles soient.

Dans son formalisme on ne trouve que des quantités continues, sous forme de fonctions continues. Les étoiles ne sont pas faites d'atomes. Ces objet sont des sphères emplies d'une matière cérite par une fonction représentant une masse volumique ρ (x,y,z) , qui est une fonction continue, à l'intérieur de cette masse. Fonction qui subit une discontinuité à la surface de l'étole, en passant brutalelent à zéro. Mais ce n'est qu'une commodité de calcul. On procède ainsi parce qu'on n'est pas capable d'assurer une décroissance continue de celle masse volumique.

Il n'y a pas non plus de photons[60], cheminant le long de géodésiques particulières. . Le processus de mesure grâce à la captation de ces photons par les télescopes n'est pas décrit. On table simplement sur l'hypothèse que la lumière suit ces trajectoires particulières[61].

Il faudrait donc compléter notre schéma en mettant :

Calcul des composantes de l'objet métrique g

↙ ↘

Calcul des géodésiques de la matière — Calcul des géodésiques de la lumière

↓

Observations

Car les confrontations de ce modèle ne se font qu'en vérifiant si les observations confirment ce que le calcul prédit au sujet des trajectoires des rayons lumineux.

A ce sujet, on a évoqué plus haut les trajectoires de particules témoins dans un champ créé par une masse positive, évoquant ne attraction, et dans une masse négative, évoquant une répulsion. Effet similaire sur des photons, subissant alors un effet de lentille gravitationnelle.

→ Nous allons, à dessein, figurer les trajectoires de ces photons en utilisant une couleur beige. Ce sont des photons d'énergie positive. Nous avons représenté à la fois la source de

[60]Ceci alors que le mot a été inventé par Einstein lui-même, lequel a reçu le prix Nobel en 1921, non pas pour sesrelativités, restreintepuis générale, mais pour sa modélisation de l'effet photoélectrique, impliquant « la théorie des quantas »

[61]Des « géodésiques de longueur nulle ».

lumière par un spot rouge foncé et l'instrument d'observation, télescope ou radio télescope également en rouge foncé, couleurs qui sera liée à la matière de masse positive.

Effet de lentille gravitationnel positif

- Cet effet de lentille gravitationnel est positif si le champ est créé par une masse positive. Cette masse se comporte alors comme une lentille convergente, en renforçant la luminosité de la source.
-

Une lentille convergente renforce la luminosité de la source.

- L'effet de lentille gravitationnel sera dit négatif, si le champ est créé par une masse négative.

L'effet de lentille gravitationnelle négatif atténue la luminosité de la source (rouge)

Cette masse négative se comporte alors comme une lentille divergente, en diminuant la luminosité de la source.

La lentille divergente disperse les rayons lumineux.

Dans ce cas on a une particularité. Comme les photons d'énergie positive n'interagissent avec les masses négatives que par « antigravitation » ils peuvent librement traverser celles-ci. On verra plus loin pourquoi.

Le Modèle Cosmologique Janus :

Dans le modèle cosmologique Janus on cherche à introduire des masses négatives, en restaurant les principes d'action-réaction et d'équivalence. On souhaite également que les masses négatives s'attirent, au lieu de se repousser. En ce sens c'est une démarche *heuristique*[62].

Ceci correspondrait alors au schéma de forces :

Janus Cosmological Model

[62] Démarche heuristique : On fait certaines hypothèses, en comptant sur le profit que l'on pourra par la suite en retirer, pour les justifier a postériori.

Il n'y a qu'un seul espace-temps, qu'une seule hypersurface quadridimensionnelle, mais on la dote d'une double structure.

Ce qui détermine les propriétés de cette hypersurface solution ce sont les courbes-trajectoires-géodésiques qui seront suivies par les particules de masse positive et les particules de masse négative.

→ On peut illustrer ce concept en prenant une feuille de papier, qui représente « l'espace ». Dans celui-ci on placera des groupes de masses positives représentées par des disques rouges et des groupes de masses négatives représentées par des disques bleu pâle

La distribution des masses, telle qu'elle est perçue
par des observateurs faits de masse positive.

On expliquera pourquoi on représente les masses positives par une teinte rouge soutenue et les masses négatives par une teinte bleu pâle.

Ça, ce sont les images des masses, telles qu'on va les présenter sur le recto de la feuille. Précisons ce que veut dire la phrase « telles qu'elles sont perçues par des observateurs faits de masse positive ». Considérons une des masses positives dont est constitué cet « observateur » une masse plus rouge. . Elle sera soumise au champ gravitationnel créé par ces particules plus en moins, en tenant compte de leur couleur.

Maintenant retournons-là. Ce sont toujours des masses « plus » et des masses « moins » mais nous modifions les couleurs.

La distribution des masses, telle qu'elle est perçue
par des observateurs faits de masse négative.

Là encore on expliquera plus loin pourquoi, « vue depuis le monde des asses négatives » celles-ci passent du bleu pâle au vert soutenu, alors que les masses positives sont passées du rouge soutenu au jaune.

Ce qui voudra dire que ce sont ces masses telles qu'elles sont perçues par un observateur fait de masses négatives. Un observateur fait de masses mois vertes, qui percevra le champ créé par ces autres particules moins vertes et ces particules plus, devenues jaunes.

Les choses vont commencer à s'éclaircir si on prend par exemple une portion d'espace où on a une unique masse, positive. Une masse qu'on décidera d'observer « des deux côtés de la feuille ». Mais seul un escargot est capable d'observer les deux côtés d'une surface à la fois :

Ne disposant pas de cette faculté, nous utiliserons un miroir.

→ En bleu pâle, les masses négatives, telles qu'elles sont perçues par les (des observateurs, ou instruments d'observation faits de) masses positives, rouges.

→ En jaune les masses positives, telles qu'elles sont perçues par (des observateurs ou des instruments d'observation faits de) masses négatives, en vert foncé.

Nous allons maintenant considérer le champ créé par une particule de masse positive en figurant une géodésique trajectoire suivie par une particule-témoin également de masse positive, qui s'inscrit sur le « recto » de la surface.

Cette trajectoire évoque une attraction.

→ A dessein, j'ai représenté la trajectoire en rouge, car elle s'inscrit dans le « monde des masses positives », sur le recto de la surface.

La tache jaune, vue dans le miroir représente la façon dont cette masse est perçue par un « habitant de l'autre face » une particule témoin de masse négative.

Envisageons maintenant la réaction de notre particule-témoin, de masse positive, vis-à-vis du champ créé, sur cette face de la surface, par une masse négative, en vert foncé, telle qu'elle se présente sur le verso de la feuille (où elle « habite ») et représentée par un disque bleu pâle telle qu'elle est « perçue » par les habitants du monde positif.

Cette géodésique-trajectoire évoque un phénomène de répulsion.

Nous allons maintenant nous situer sur l'autre face de la surface, là où « habitent » les particules de masse négative. Conformément aux lois d'interaction que nous nous sommes données, heuristiquement, on obtient alors les schémas ci-après : J'ai représenté cette trajectoire en vert, car elle s'inscrit sur le verso de la feuille.

Une telle trajectoire évoque une attraction.

Maintenant la trajectoire, verte, d'une masse négative, s'inscrivant sur le verso de la feuille, sous l'effet du champ gravitationnel créé par une masse positive, rouge, qui « lui apparaît » selon une tache jaune pâle.

Tandis que celle-ci évoque une répulsion.

Il n'y a qu'un seul espace : la feuille de papier. Des masses positives sont apposées sur une de ses faces, arbitrairement : le recto de la feuille. Elles circulent selon un ensemble de courbes-géodésiques-trajectoires qui sont figurées la couleur rouge.

Des masses négatives « habitent » sur le verso de la feuille. Ces ensembles de masses cheminent selon des courbes-trajectoires géodésique, de couleur verte, qui constitueront un entrelac serré, avec tous les mouvements possibles. Mais les trajectoires des masses positives s'inscriront en rouge sur le recto de la feuille, et celles de masses négatives en vert sur son verso.

Le dessin ci-après est peut-être le plus important, au sens où il tente de faire comprendre que sur le recto et sur le verso de la surface s'inscrivent :

des ensembles de géodésiquescomplètement différents,

qui représentent la façon dont les masses positives et les masses négatives se comportent quand elles sont soumises au champ gravitationnel créé par un ensemble de masses positives et de masses négatives, on représenté. Un champ qu'elles « perçoivent » différemment.

→Ce qui sera « attractif » pour les masses positives sera
« répulsif » pour les masses négative, et vice-versa.

Il va falloir maintenant figurer les trajectoires des photons. Il y en aura donc de deux espèces. Ceux de notre monde positif, d'énergie positive, et ceux de notre monde négatif, d'énergie négative.

Plus haut on avait figuré les trajectoires des photons d'énergie positive par la couleur beige. Ces trajectoires s'inscrivent « sur le recto de la feuille ».

On utilisera la couleur violette pour représenter les trajectoires des photons d'énergie négative, qui s'inscrivent sur le verso de la surface. On obtient alors ceci :

→ Les photons d'énergie positive (orange) cheminent de masses positives en masses positives (rouges). Une masse positive croisée sur leur chemin leur confère un effet de lentille gravitationnelle positif. Effet de lentille négatif si c'est une masse négative.

→ Conclusions inverses pour les photons d'énergie négative (violets).

→ Il n'y a pas d'échanges de photons entre masses positives et masses négatives.

De ce fait :

→ Les structures constituées de masse négative sont invisibles pour les observateurs (et instruments d'observation) constitués de masse positive.

→ Les galaxies, étoiles, planètes de masse positive seraient invisible pour des observateurs constitués de masse négative. Mais, comme on le verra plus loin, il n'y en a pas. Tout simplement parce que ce monde négatif ne crée ni étoiles, ni galaxies, ni planètes et que la vie en est absentes.

→ Par contre, si des voyageurs parviennent, dans u véhicule, à « inverser leur masse », et celle de leur véhicule, ils ne percevront plus que ces photons d'énergie négative. Le monde négatif apparaîtra alors à leurs yeux. Inversement les étoiles, planètes, galaxies ne seront plus visibles. Ceux qui observaient ce véhicule auront l'impression que celui-ci s'est soudain « dématérialisé » sous leurs yeux.

C'est le moment maintenant d'envisager un schéma de calcul différent de ce qu'on faisait avec la relativité générale, où il n'y avait qu'une seule population de photons, d'énergie négative, et qu'une seule famille de géodésiques, suivies par les particules de masse positive. Ces courbes étaient construites à partir d'une solution qui s'exprimait sous la forme d'une unique métrique-solution.
Là, nous avons deux familles de géodésiques, donc deux solutions métriques, émergeant chacune de leur équation de champ, analogue à l'équation d'Einstein ?

On parlera de configuration *bimétrique* ou de *bigéométrie*.

Envisageons un schéma théorique :

Contenus en masses positives et négatives

↙ ↘

Action sur les masses (+)	Action sur les masses (-)
↓	↓
Equation de champ des (+)	Equation de champ des (+)
↓	↓
Hypothèses de symétries des (+)	Hypothèses de symétries des (-)
↓	↓
Forme de la métrique-solution g(+)	Forme de la métrique-solution g(-)
↓	↓
Calcul des termes de R(+)	Calcul des termes de R(-)
↓	↓
Métrique-solution g(+)	Métrique-solution g(-)
↓	↓
Géodésiques (+)	Géodésiques (-)

Comment peut-on formaliser cela mathématiquement et géométriquement ?

Très rares sont ceux qui ont envisagé de telles structures bimétriques. On en compte deux. Les premier est le Français Académicien Thibault Damour. La seconde est l'allemande Sabine Hossefelder. Commençons par le premier.

L'essai de Damour se situe à l'époque où les spécialistes de cosmologie agitent deux nouvelles idées : .

- La première consiste à imaginer que l'univers auquel nous avons accès grâce à nos observations n'est qu'une hypersurface à quatre dimensions, à laquelle on décide de donner le nom de « brane ». Un néologisme inspira du mot « membrane ». Une surface 2D au sens classique du terme, devient une 2-brane. Un espace 3D une 3-brane et l'espace-temps une 4-brane. Toute brane à n dimensions est censée être plongée dans un espace doté d'un nombre de dimensions suprérieur.

  En 2002 Thibault Damour et Ian Kogan imaginent donc une nombre illimité de 4-branes flottant dans un espace doté d'un nombre de dimensions plus important. Les points de ces branes sont alors reliés par les sortes de fils le long desquels se transmet la force de gravitation.

- La seconde idée a donné naissance à ce qu'on a appelé la massive gravity. On a vu qu'il n'avait pas à ce jour été possible de quantifier la gravitation, c'est-à-dire de construire un modèle correct de graviton. Qu'à cela ne tienne, en 1930 Wolfang Pauli et MerkusFierz décide de doter les gravitons d'une masse. Ceci crée aussitôt une forme d'instabilité qu'on qualifie de fantomatique.

  Il y a une chose assez amusante. Il arrive que les scientifiques fabriquent des chimères. Celles-ci engendrent alors des problèmes qu'ils tentent alors de résoudre. Cela donne des articles du plus bel effet. On peut aussi rédiger des thèses de doctorat, où on effectue un classement des différents modèles de massive gravity. Ces colloques sont organisés où ont lieu des échanges entre spécialistes à la recherche d'une « ghost-free » solution. On crée des prix pour stimuler l'émergence d'idées[63]. Quand des groupes parviennent à s'imposer, on associe leurs noms pour crée un nouvel acronyme qui désigne un nouveau modèle[64].

---

[63] En 2018 Claudia de Rham, d'imperialCollege, alors âgée de 40 ans, reçoit le prix Blavatnik, « destiné aux jeunes chercheurs » pour « sa revitalisation de la théorie de la massive gravity.

[64] Ainsi est né le modèle dRGT, pour de Rham – Gabadadze – Tolley.